

จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันแบบไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดลอริก

นางสาวพรศิริ เพิ่มทรัพย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

KINETICS OF NON-CATALYTIC ESTERIFICATION OF LAURIC ACID

Miss Pornsiri Permsup

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ที่เคชันแบบไม่ใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดลอริก

โดย

นางสาวพรศิริ เพิ่มทรัพย์

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สุทธิธรรมา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุนา)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เหมื่อนเดือน พิศาลพงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ขจรศักดิ์ เฟื่องนวกิจ)

พรศิริ เพิ่มทรัพย์ : จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดลอริก. (KINETICS OF NON-CATALYTIC ESTERIFICATION OF LAURIC ACID) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร. เจดศักดิ์ ไชยคุนา, 80 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา จลนพลศาสตร์ของ ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกรดลอริกและเมทานอล โดยทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะเพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วยวของกรรกรวนสารละลาย ความดัน อุณหภูมิ และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก จากการศึกษาพบว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกรดลอริกและเมทานอลเป็นปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับได้ ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้น อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง และดำเนินไป จนเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่ง ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรืออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก โดยที่ความเร็วยวของกรรกรวนสารละลาย มากกว่า 200 รอบต่อนาที และความดันมากกว่า 800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะ ไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา และพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดลอริกมีค่า 44.87 กิโลจูลต่อโมล

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2554.....

5170685921 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ESTERIFICATION/ NON-CATALYTIC/ METHYL ESTER/ KINETICS/
LAURIC ACID

PORNSIRI PERMSUP: KINETICS OF NON-CATALYTIC ESTERIFICATION OF
LAURIC ACID. ADVISOR: JIRDSAK TSCHEIKUNA, Ph.D.,80 pp.

Kinetics of non-catalytic esterification reaction of lauric acid with methanol was investigated in this study. The experiments were conducted in a batch reactor to study the effects of stirring speed, pressure, temperature and molar ratio of methanol to lauric acid. The results show that non-catalytic esterification reaction of lauric acid and methanol is a second order reversible reaction. The reaction occurs at high temperature and proceeds rapidly during initial period. Conversion of lauric acid increases with increasing of temperature as well as molar ratio of methanol to lauric acid. Rate of a non-catalytic esterification reaction does not depend on stirring speed above 200 rpm and pressure above 800 psi. The activation energy of non-catalytic esterification reaction of lauric acid was 44.87 kJ/mol.

Department :Chemical Engineering..... Student's Signature

Field of Study : ...Chemical Engineering..... Advisor's Signature

Academic Year : 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ต้องกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุณา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำ การอบรมสั่งสอนในการปฏิบัติงาน และความช่วยเหลือในทุกด้าน ตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธรรวัช ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ และ ดร.ขจรศักดิ์ เพ็ญนวกิจ กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและแก้ไขข้อผิดพลาด ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา รวมถึงทุกท่านที่มีส่วนให้การสนับสนุนช่วยเหลือในการทำงานวิจัย สำหรับคุณความดีอันเกิดจากงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.2 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา....	8
2.2 จลนพลศาสตร์เคมี.....	12
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาจลนพลศาสตร์เคมี.....	18
3 การทดลองและการวิเคราะห์.....	21
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.2 วิธีการทดลอง.....	22
3.2.1 ขั้นตอนการทำการทดลอง.....	22
3.2.2 สภาวะของการทดลอง.....	23
3.3 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	23
3.3.1 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารตั้งต้น.....	23
3.3.2 การวิเคราะห์หาค่าของกรด.....	27
3.3.3 การวิเคราะห์หาค่าสะปอนนิฟิเคชัน.....	29
3.4 วิธีการคำนวณต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย.....	29
3.4.1 การคำนวณค่าของกรด.....	30

บทที่	หน้า
3.4.2 การคำนวณค่าสะพานนิฟิเคชัน.....	31
3.4.3 การคำนวณหามวลโมเลกุล.....	32
3.4.4 การคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น.....	32
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	37
4.1 ผลกระทบของความเร็วยวของของการกวนสารละลาย.....	40
4.2 ผลกระทบของความดันในการทำปฏิกิริยา.....	42
4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา.....	44
4.4 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอร์ริก.....	47
4.5 แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์นิฟิเคชัน.....	49
4.6 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์นิฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	51
5 สรุปผลการวิจัย.....	56
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	57
รายการอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก ก.....	62
ภาคผนวก ข.....	64
ภาคผนวก ค.....	68
ภาคผนวก ง.....	72
ภาคผนวก จ.....	76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	80

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	21
3.2	สภาวะของการทดลอง.....	23
3.3	สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี.....	24
3.4	แสดง Retention Time ของเมทิลเอสเทอร์.....	25
3.5	องค์ประกอบของสารตั้งต้น.....	26
3.6	คุณสมบัติของกรดลอริก.....	27
3.7	น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้ในการไทเทรตเพื่อหาค่าของกรด.....	28
4.1	แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ โดยใช้ความเร็วรอบ 50, 100, 200 และ 600 รอบต่อนาที.....	40
4.2	แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ โดยใช้ความดัน 800, 1000, 1200 และ 1400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	43
4.3	แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ โดยใช้อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส.....	45
4.4	แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ โดยใช้อัตราส่วน โดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกที่ 1:1, 2.5:1, 5:1 และ 10:1.....	47
4.5	แสดงค่าความชันของกราฟที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส	52
4.6	แสดงค่าคงที่ปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ.....	53
4.7	แสดงค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	54
ก-1	ผลการทดลองเมื่อใช้ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก 5:1 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	62
ก-2	ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยและร้อยละของความคลาดเคลื่อนของการทดลอง เมื่อใช้ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรด ลอริก 5:1 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	63

ตารางที่	หน้า
ง-2 ผลการทดลองเมื่อใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสในการทำปฏิกิริยา ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก 1:1 และความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	73
ง-3 ผลการทดลองเมื่อใช้อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสในการทำปฏิกิริยา ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก 1:1 และความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	74
ง-4 ผลการทดลองเมื่อใช้อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสในการทำปฏิกิริยา ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก 1:1 และความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	75
จ-1 ผลการทดลองเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกที่ 1:1 ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	76
จ-2 ผลการทดลองเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกที่ 2.5:1 ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	77
จ-3 ผลการทดลองเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกที่ 5:1 ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	78
จ-4 ผลการทดลองเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกที่ 10:1 ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	79

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชัน.....	5
3.1	เครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.2	โครมาโตแกรมของเมทิลเอสเทอร์จากการวิเคราะห์สารตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์..	25
3.3	โครมาโตแกรมของเมทิลเอสเทอร์จากการวิเคราะห์สารตั้งต้น.....	26
4.1	โครมาโตแกรมจากการวิเคราะห์เฟสเมทิลเอสเทอร์ของสารตัวอย่าง.....	39
4.2	โครมาโตแกรมจากการวิเคราะห์เฟสน้ำของสารตัวอย่าง.....	39
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกและเวลา โดยใช้ความเร็วรอบ 50, 100, 200 และ 600 รอบต่อนาที.....	41
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกและเวลา โดยใช้ความดัน 800, 1000, 1200 และ 1400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	44
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกและเวลา โดยใช้อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส.....	46
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกและเวลา โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกที่ 1:1, 2.5:1, 5:1 และ 10:1.....	48
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลองและเวลา.....	50
4.8	กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแบบจำลองที่แตกต่างกัน.....	51
4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส.....	52
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่ปฏิกิริยากับอุณหภูมิตามสมการอาร์เรเนียส.....	54

บทที่ 1

บทนำ

เมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester) สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้หลายประเภท เช่น น้ำหอม เครื่องสำอาง สารหล่อลื่น เป็นต้น [1] เมทิลเอสเทอร์สามารถผลิตได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) และปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) โดยใช้น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์และแอลกอฮอล์ (Alcohol) เป็นวัตถุดิบ ซึ่งส่วนมากนิยมวิธีการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้ น้ำมันพืชเป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับเมทานอลและใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะเป็นวิธีที่ให้อัตราผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์สูง แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ มีสบู่เกิดขึ้น เนื่องจากกรดไขมันอิสระที่ปนอยู่กับน้ำมันพืชที่ใช้เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับเบสที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสบู่ที่ได้จะเป็นตัวขัดขวางการแยกเมทิลเอสเทอร์ออกจากกลีเซอรอลที่เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ทำให้อัตราผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์ลดน้อยลง

ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดสบู่ที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ จึงเลือกวิธีการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้กรดไขมัน หรือ แพตตีแอซิด (Fatty Acid) และเมทานอลเป็นสารตั้งต้น แทนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ โดยวิธีนี้จะทำให้ได้เมทิลเอสเทอร์และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

การผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันจากกรดไขมัน โดยการใส่กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นวิธีที่นิยมมากวิธีหนึ่ง แต่วิธีนี้มีข้อเสียหลายด้าน เช่น ปัญหาคาต้นทุนสูง ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น เนื่องจากเมื่อทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้นจะต้องผ่านกระบวนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะนำเมทิลเอสเทอร์ไปใช้งาน ซึ่งขั้นตอนของกระบวนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย [2] และตัวเร่ง

ปฏิกิริยาที่ไม่สามารถนำกลับไปใช้ซ้ำยังส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้ด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดของแข็งซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยายังคงต้องผ่านกระบวนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดของแข็งออกจากผลิตภัณฑ์เช่นกัน ดังนั้นการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาจะทำให้ได้ข้อมูลต่างๆ เช่น อัตราการเกิดปฏิกิริยา ค่าคงที่ปฏิกิริยา ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ โดยงานวิจัยส่วนมากได้รายงานผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน แต่สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันยังไม่เป็นที่แพร่หลาย

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดลอริก โดยศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ ความเร็วรอบของการกวนสารละลาย อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก ความดัน และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดลอริก โดยศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริก ได้แก่ ความเร็วรอบของการกวนสารละลาย อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก ความดัน และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

ในการศึกษาข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดลอริก มีตัวแปรที่ทำการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ความเร็วรอบในการกววนสารละลายที่ 50, 100, 200 และ 600 รอบต่อนาที
2. ความดันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ 800, 1000, 1200 และ 1400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
3. อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอิริกที่อัตราส่วน 1:1, 2.5:1, 5:1 และ 10:1
4. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 100, 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

สามารถนำข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองไปประยุกต์เพื่อใช้สำหรับการออกแบบและควบคุมกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

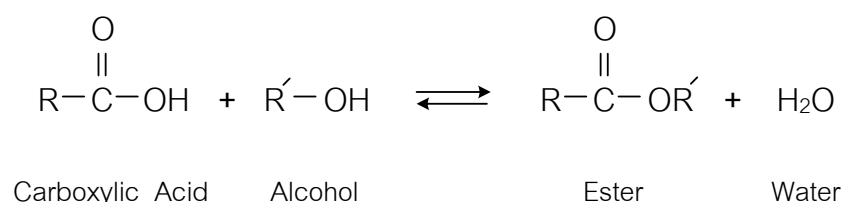
สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ และจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน เพื่อเป็นแนวทางที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้

แฟตตี้ แอซิด เมทิลเอสเทอร์ (Fatty Acid Methyl Ester) หรือเมทิลเอสเทอร์ คือ สารประกอบเอสเทอร์ชนิดหนึ่ง ที่มีสูตรโมเลกุล CH_3COOR โดย R เป็นหมู่อัลคิล (Alkyl Group) ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของกรดไขมันและเป็นตัวกำหนดชื่อของเมทิลเอสเทอร์ เช่น เมทิลปาล์มมิเตต (Methyl Palmitate) เมื่อ R คือ กรดปาล์มมิติก (Palmitic Acid) เมทิลโอเลเอต (Methyl Oleate) เมื่อ R คือ กรดโอเลอิก (Oleic Acid) เมทิลลอเรต (Methyl Laurate) เมื่อ R คือ กรดลอริก (Lauric Acid) เป็นต้น

เมทิลเอสเทอร์สามารถผลิตได้หลายวิธี โดยทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมวิธีการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดเบส ปฏิกิริยานี้ใช้น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์และแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอลหรือเอทานอล เป็นสารตั้งต้น ถึงแม้ว่าเอทานอลจะเป็นแอลกอฮอล์ที่เกิดจากกระบวนการหมักของผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งทำให้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าเมทานอล แต่อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรมการผลิตเมทิลเอสเทอร์นิยมใช้เมทานอล เนื่องจากเมทานอลมีราคาถูกกว่า และมีข้อได้เปรียบทางกายภาพและเคมี เพราะเป็นแอลกอฮอล์สายสั้นจึงเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย [3] ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดเบสที่นิยมใช้เพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide) หลังจากปฏิกิริยาเสร็จสิ้นแล้วจะได้เมทิลเอสเทอร์เป็นผลิตภัณฑ์ และกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ซึ่งกลีเซอรอลมีความหนาแน่นมากกว่าเมทิลเอสเทอร์จึงง่ายต่อการแยกออกจากเมทิลเอสเทอร์ [4] แต่ข้อเสียของวิธีนี้ คือ การนำ

น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระเจือปนอยู่มากกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มาใช้เป็นสารตั้งต้น จะทำให้เกิดปฏิกิริยาสะaponนิฟิเคชัน (Saponification) เป็นปฏิกิริยาข้างเคียง ทำให้เกิดสบู่ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ เนื่องจากกรดไขมันอิสระที่อยู่ในน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพังก์ชนิดเบสได้สบู่ ซึ่งสบู่ที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวางกระบวนการแยกเมทิลเอสเทอร์ออกจากกลีเซอริน [5] ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดปฏิกิริยาสะaponนิฟิเคชัน จึงมีการนำกรดไขมันอิสระมาทำปฏิกิริยากับเมทานอล โดยจะได้เมทิลเอสเทอร์และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน คือ ปฏิกิริยาการเตรียมเอสเทอร์ ซึ่งใช้กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic Acid) และแอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา ซึ่งได้เอสเทอร์และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ โดยปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ซึ่งสามารถแสดงสมการเคมีได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน

เนื่องจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แอลกอฮอล์ให้มากเกินพอเพื่อให้สมดุลเลื่อนไปทางขวา [6] เพื่อทำให้ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์มากขึ้น การผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน สามารถทำได้ทั้งแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น

Sinart Chongkhong และคณะ [7] ได้ศึกษากระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยใช้กรดไขมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงและเมทานอลเป็นสารตั้งต้น และใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการทดลอง

เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันปาล์มที่ 0.4:1 – 12:1 อุณหภูมิในช่วง 70 – 100 องศาเซลเซียส ปริมาณของกรดซัลฟิวริกที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ร้อยละ 0 – 5.502 โดยน้ำหนักของกรดซัลฟิวริกต่อกรดไขมันปาล์ม และระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 15 – 240 นาที จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยาโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันปาล์มที่ 5.3:1 อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส ปริมาณของกรดซัลฟิวริกร้อยละ 1.834 โดยน้ำหนักของกรดซัลฟิวริกต่อกรดไขมันปาล์ม และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์คิดเป็นร้อยละ 98

Young Moo Park และคณะ [8] ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยใช้น้ำมันที่ผ่านการประกอบอาหารซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงเป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับเมทานอล และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดของแข็ง 3 ชนิด ได้แก่ H-zeolite, WO_3/Al_2O_3 และ WO_3/ZrO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการกวนสารละลายที่ 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 9:1 และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.3 กรัมต่อมิลลิลิตรของน้ำมัน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า WO_3/ZrO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระมากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นที่สภาวะเดียวกัน เนื่องจาก WO_3/ZrO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมากที่สุด จึงทำให้มีพื้นที่สำหรับการแพร่ของอนุภาคมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ จากนั้นจึงทำการทดลองโดยเลือกใช้ WO_3/ZrO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ อุณหภูมิในช่วง 75 – 200 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ 0.1 – 0.5 กรัมต่อมิลลิลิตรของน้ำมัน และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 – 12:1 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ WO_3/ZrO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.4 กรัมต่อมิลลิลิตรของน้ำมัน และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล

ต่อน้ำมันที่ 9:1 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระเท่ากับ 96 และได้ทำการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้มากกว่า 4 ครั้ง ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกรองแยกออกจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ แล้วล้างในเฮกเซน (Hexane) เพื่อกำจัดสารประกอบที่ไม่มีชั้นบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากนั้นจึงนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยที่ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากเมื่อเทียบกับการใช้ครั้งแรก

Yaohoi Feng และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน 3 ชนิด ได้แก่ เอ็นเคซี-9, 001x7 และ ดี-61 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้น้ำมันที่ผ่านการประกอบอาหารแล้ว ซึ่งมีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 13.7 มิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมของน้ำมันเป็นสารตั้งต้น ทำปฏิกิริยากับเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่อุณหภูมิ 64 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1 และตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนทั้ง 3 ชนิด คือ เอ็นเคซี-9, 001x7 และ ดี-61 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ร้อยละ 79.7, 32.2 และ 10.3 ตามลำดับ เนื่องจากเรซินแลกเปลี่ยนไอออนเอ็นเคซี-9 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มากที่สุด ซึ่งเป็นเรซินที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมากที่สุด ทำให้มีพื้นที่สำหรับการแพร่มากกว่าเรซินชนิดอื่นๆ ดังนั้นจึงถูกเลือกมาเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ร้อยละ 6 – 24 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยาในช่วง 60 – 68 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 1:1 – 7:1 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนจากร้อยละ 6 ไปจนถึงร้อยละ 20 จะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่แม้ว่าจะเพิ่มปริมาณเรซินไปจนถึงร้อยละ 24 และการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจาก 60 จนถึง 66 องศาเซลเซียส จะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 66 องศาเซลเซียสขึ้นไป จะทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันลดลง เนื่องจากเมทานอลบางส่วนได้ระเหยกลายเป็นไอ และการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของ

เมทานอลต่อน้ำมันจาก 1:1 จนถึง 7:1 ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 จะให้ได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันสูงที่สุด ขณะที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง ให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 95.4 โดยน้ำหนัก และตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีก 10 ครั้ง โดยการกรองแยกออกจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ ล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดสิ่งเจือปน จากนั้นจึงแช่ในเมทานอล และเก็บไว้ในที่ไม่มีอากาศผ่านได้

จากงานวิจัยทั้งสามได้กล่าวถึงวิธีการผลิตเมทิลเอสเทอร์โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดของแข็ง และเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งสามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ข้อเสียของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด คือ การกัดกร่อนที่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม การแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ทำได้ยาก และยังเป็นภาระสิ้นเปลืองเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีก [10] การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบของแข็งและเรซินแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ แต่อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบของแข็งและเรซินแลกเปลี่ยนไอออนยังคงมีข้อเสีย คือ ใช้เวลานานในการทำปฏิกิริยา และต้องมีขั้นตอนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังต้องมีกระบวนการของการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน โดยทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่าย ดังนั้นจึงมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับวิธีการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

Duangkamol Yujaroen และคณะ [11] ได้ศึกษากระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กรดไขมันปาล์มที่ประกอบด้วยกรดไขมันอิสระร้อยละ 93 โดยน้ำหนักเป็นสารตั้งต้น ทำปฏิกิริยากับเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ทำการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ อุณหภูมิในช่วง 250 – 300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันปาล์มตั้งแต่ 1:1 – 12:1 และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 0 – 80 นาที และเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 250 – 300

องศาเซลเซียส ความดันคงที่ในช่วง 1450 – 2175 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลที่ 6:1 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิจาก 250 ถึง 300 องศาเซลเซียส จะทำให้อัตราผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่การเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจะลดความเป็นขี้ของเมทานอลเนื่องจากเกิดการสลายพันธะไฮโดรเจนของเมทานอล ซึ่งมีผลทำให้กรดไขมันปาล์มสามารถละลายในเมทานอลได้ดียิ่งขึ้น และเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันปาล์มจาก 1:1 ไปจนถึง 6:1 จะทำให้อัตราผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเมทานอลจะทำให้สมดุลเลื่อนไปทางขวา มีผลทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดมากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันปาล์มจาก 6:1 ไปจนถึง 12:1 จะทำให้อัตราผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีค่าน้อยลง ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากเมทานอลที่ใช้เป็นสารตั้งต้นมีความบริสุทธิ์เพียงร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก จึงมีน้ำเจือปนอยู่ในปริมาณมาก มีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับที่เกิดขึ้นจากน้ำและเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันปาล์มตั้งแต่ 1:1 – 12:1 ที่อุณหภูมิ 250 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่าค่าอัตราผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ของทั้งสองสภาวะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อทำการทดลองโดยเก็บตัวอย่างที่เวลาต่างกัน พบว่า ค่าอัตราผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยไปจนเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 70 นาที ส่วนค่าอัตราผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้าสู่สภาวะสมดุลในช่วง 30 นาทีแรก ดังนั้นจึงสรุปว่า เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันปาล์มเข้าสู่สภาวะสมดุลจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

Watcharat Ngamsa-ard [12] ได้ทำการศึกษาระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์โดยใช้น้ำมันปาล์มที่ผสมกรดไขมันปาล์มร้อยละ 4.5 โดยน้ำหนักเป็นสารตั้งต้น ทำปฏิกิริยากับเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ซึ่งการทดลองถูกแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยการทดลองในขั้นตอนแรกเป็นการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60, 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส และความดันที่ 14.7, 500 และ 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1, 6:1 และ 9:1 และการทดลองในขั้นตอนที่สองเป็นการทำปฏิกิริยา

ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้โซเดียมเมทิลเลท (Sodium Methylate) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ จากการทดลองพบว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดไขมันปาล์มไม่สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 150 ไปจนถึง 250 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันปาล์มมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มความดันในการทำปฏิกิริยาจาก 500 เป็น 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีผลทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันปาล์มมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความดันจะทำให้เมทานอลมีจุดเดือดสูงขึ้น และเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันปาล์มตั้งแต่ 3:1 ไปจนถึง 9:1 จะทำให้ค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย โดยเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส และความดันที่ 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระจากร้อยละ 4.5 เหลือน้อยกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อนำมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันในขั้นตอนที่สอง จะให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ร้อยละ 90 ในเวลา 1 ชั่วโมง

Sittichai Somsai [13] ได้ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กรดไขมันปาล์มที่ประกอบด้วยกรดไขมันอิสระร้อยละ 90.05 โดยน้ำหนักเป็นสารตั้งต้น ทำปฏิกิริยากับเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ อุณหภูมิตั้งแต่ 60 ถึง 300 องศาเซลเซียส ความดันที่ 500 และ 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันปาล์มที่ 1:1, 5:1 และ 10:1 เป็นเวลา 300 นาที จากการทดลองพบว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันปาล์มและเมทานอลไม่สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 150 ไปจนถึง 300 องศาเซลเซียส จะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันปาล์มมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดันที่ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยสามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระจากร้อยละ 90.05 เหลือร้อยละ 26.82 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันปาล์ม ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันปาล์มที่สภาวะสมดุลมีค่า

เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเมทานอลจะทำให้สมดุลเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างรวดเร็วภายในเวลา 90 นาที และเริ่มคงที่ที่เวลา 100 นาทีเป็นต้นไป และเมื่อทำการเพิ่มความดันของปฏิกิริยาจาก 500 เป็น 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันปาล์มมีค่าใกล้เคียงกันมาก

Alenezi และคณะ [14] ได้ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กรดไขมันอิสระเป็นสารตั้งต้น ทำปฏิกิริยากับเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ทำการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระตั้งแต่ 0.7:1 – 7:1 ความเร็วรอบของการกวนสารละลายที่ 430 830 และ 1630 รอบต่อนาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ 250 – 320 องศาเซลเซียส ที่ความดันคงที่ 1450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่าเมื่อทำการทดลองโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระที่ 0.7:1 จะทำให้ค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เข้าสู่สภาวะสมดุลที่ร้อยละ 52 โดยน้ำหนัก และเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระจาก 1:1 ไปจนถึง 7:1 จะทำให้ค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และยังมีผลทำให้ค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ที่สภาวะสมดุลมีค่ามากขึ้นอีกด้วย เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของเมทานอลจะเป็นการทำให้สมดุลเลื่อนไปทางขวา และเมื่อทำการทดลองโดยเพิ่มความเร็วรอบในการกวนสารละลายตั้งแต่ 430 ไปจนถึง 1630 รอบต่อนาที พบว่าค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 250 – 320 องศาเซลเซียส พบว่า ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเข้าสู่สภาวะสมดุลภายในเวลา 20 นาที โดยที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส สามารถให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ร้อยละ 97 ภายในเวลาเพียง 5 นาที

Kusdiana และ Saka [15] ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ไขมันเมล็ดเรพ (Rapeseed Oil) และเมทานอลเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 270, 300 และ 350 องศาเซลเซียสเพื่อเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) และปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจากกรดไขมันอิสระในน้ำมันเมล็ดเรพ พบว่าเมื่อ

เปรียบเทียบที่สภาวะเดียวกันอัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันมีแนวโน้มสูงกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์รีฟเคชัน นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดโอเลอิกตั้งแต่ 1:1 – 40:1 ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในการควบคุมปฏิกิริยา โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที พบว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดโอเลอิกตั้งแต่ 1:1 จนถึง 3:1 จะทำให้ค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดโอเลอิกมากกว่า 3:1 ขึ้นไป ค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์จะไม่มีเปลี่ยนแปลง ซึ่งการใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันที่เหมาะสมจะช่วยให้กระบวนการผลิตใช้พลังงานน้อยลง

ดังนั้นปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการผลิตเมทิลเอสเทอร์ เนื่องจากสามารถลดปัญหาการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ใช้เวลาน้อยในการทำปฏิกิริยา และไม่ต้องมีกระบวนการสำหรับการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

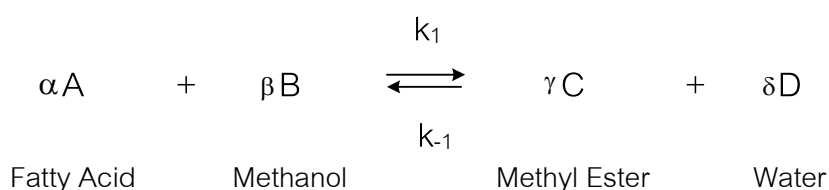
1. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองอยู่ระหว่าง 60 – 320 องศาเซลเซียส
2. ความดันที่ใช้ในการทดลองที่ 14.7 – 2175 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
3. อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ใช้เป็นสารตั้งต้นที่ 0.7:1 ถึง 40:1
4. อัตราเร็วของการกวน 430 – 1630 รอบต่อนาที
5. เวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 0 – 300 นาที

2.2 จลนพลศาสตร์เคมี

จลนพลศาสตร์เคมี เป็นการศึกษาเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา และกลไกในการเกิดปฏิกิริยา โดยส่วนมากจะทำการศึกษาค่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา และรวมถึงการ

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) เพื่ออธิบายการดำเนินไปของปฏิกิริยา ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันและเมทานอล ซึ่งได้เมทิลเอสเทอร์และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ สามารถแสดงได้ด้วยสมการดังนี้



และสามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$-r_A = k_1 C_A^\alpha C_B^\beta - k_{-1} C_C^\gamma C_D^\delta$$

โดยที่ C_A คือ ความเข้มข้นของกรดไขมัน

C_B คือ ความเข้มข้นของเมทานอล

C_C คือ ความเข้มข้นของเมทิลเอสเทอร์

C_D คือ ความเข้มข้นของน้ำ

α คือ อันดับปฏิกิริยาของกรดไขมัน

β คือ อันดับปฏิกิริยาของเมทานอล

γ คือ อันดับปฏิกิริยาของเมทิลเอสเทอร์

δ คือ อันดับปฏิกิริยาของน้ำ

k_1 คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาไปข้างหน้า (Forward Reaction Rate Constant)

k_{-1} คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาไปย้อนกลับ (Reverse Reaction Rate Constant)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำนายอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ ซึ่งจะถูกเขียนในรูปของสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยแบ่งการพิจารณาปฏิกิริยาออกเป็น 2 กรณี ได้แก่

1) ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบไม่ผันกลับ โดยจะถูกกำหนดด้วยสมมุติฐานดังต่อไปนี้

- ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบไม่ผันกลับ และเกิดขึ้นในเฟสเดียวกัน
- ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง

จากสมมุติฐานข้างต้นสามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A C_B \quad (2.1)$$

เมื่อเปลี่ยนสมการ 2.1 ให้อยู่ในรูปของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันจะได้

$$\frac{dx_A}{dt} = k_1 C_{A_0} (1 - x_A)(M - x_A) \quad (2.2)$$

กรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันเท่ากับ 1:1 ($M = 1$) เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2.2 จะได้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$\frac{x_A}{1 - x_A} = k_1 C_{A_0} t \quad (2.3)$$

กรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันไม่เท่ากับ 1:1 ($M \neq 1$) เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2.2 จะได้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$\ln \frac{(M - x_A)}{M(1 - x_A)} = k_1 C_{A_0} (M - 1) t \quad (2.4)$$

และสำหรับกรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันมากกว่า 1:1 ซึ่งเป็น การเพิ่มปริมาณของเมทานอลให้มากเกินพอ จนกระทั่งความเข้มข้นของเมทานอลไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา (Pseudo-first Order) สามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A \quad (2.5)$$

เมื่อเปลี่ยนสมการ 2.5 ให้อยู่ในรูปของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันจะได้

$$\frac{dx_A}{dt} = k_1 C_{A_0} (1 - x_A) \quad (2.6)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2.6 จะได้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$\ln (1 - x_A) = -k_1 t \quad (2.7)$$

2) ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ โดยจะถูกกำหนดด้วยสมมุติฐานดังต่อไปนี้

- ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ และเกิดขึ้นในเฟสเดียวกัน
- ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง

จากสมมุติฐานข้างต้นสามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A C_B - k_{-1} C_C C_D \quad (2.8)$$

พิจารณาที่สภาวะสมดุลจะได้

$$-\frac{dC_A}{dt} = 0 = k_1 C_{A_e} C_{B_e} - k_{-1} C_{C_e} C_{D_e} \quad (2.9)$$

จะได้ค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลดังนี้

$$K_e = \frac{k_1}{k_{-1}} = \frac{C_{C_e} C_{D_e}}{C_{A_e} C_{B_e}} = \frac{x_{A_e}^2}{(1 - x_{A_e})(M - x_{A_e})} \quad (2.10)$$

เมื่อเปลี่ยนสมการ 2.9 ให้อยู่ในรูปของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันจะได้

$$\frac{dx_A}{dt} = k_1 C_{A_0} (1 - x_A)(M - x_A) - k_{-1} C_{A_0} x_A^2 \quad (2.11)$$

แทนค่า k_1 จากสมการที่ 2.10 ลงในสมการที่ 2.11 จะได้

$$\frac{dx_A}{dt} = k_1 C_{A_0} \left[(1-x_A)(M-x_A) - \frac{(1-x_{A_e})(M-x_{A_e})x_A^2}{x_{A_e}^2} \right] \quad (2.12)$$

กรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันเท่ากับ 1:1 ($M = 1$) เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2.12 จะได้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$\ln \frac{x_{A_e} - (2x_{A_e} - 1)x_A}{x_{A_e} - x_A} = 2k_1 C_{A_0} \left(\frac{1}{x_{A_e}} - 1 \right) t \quad (2.13)$$

กรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันไม่เท่ากับ 1:1 ($M \neq 1$) เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2.11 จะได้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$\ln \frac{x_{A_e} - \left(\frac{1+M}{M} x_{A_e} - 1 \right) x_A}{x_{A_e} - x_A} = 2k_1 C_{A_0} \left(\frac{M}{x_{A_e}} - \frac{M+1}{2} \right) t \quad (2.14)$$

และสำหรับกรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันมากกว่า 1:1 ซึ่งเป็น การเพิ่มปริมาณของเมทานอลให้มากเกินไป จนกระทั่งความเข้มข้นของเมทานอลไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา (Pseudo-first Order) สามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A - k_{-1} C_C C_D \quad (2.15)$$

พิจารณาที่สภาวะสมดุลจะได้

$$-\frac{dC_A}{dt} = 0 = k_1 C_{A_e} - k_{-1} C_{C_e} C_{D_e} \quad (2.16)$$

ดังนั้นจะได้ค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลดังนี้

$$K_e = \frac{k_1}{k_{-1}} = \frac{C_{C_e} C_{D_e}}{C_{A_e}} = \frac{C_{A_0} x_{A_e}^2}{(1-x_{A_e})} \quad (2.17)$$

เมื่อเปลี่ยนสมการ 2.16 ให้อยู่ในรูปของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันจะได้

$$\frac{dx_A}{dt} = k_1(1-x_A) - k_{-1}C_{A_0}x_A^2 \quad (2.18)$$

แทนค่า k_{-1} จากสมการที่ 2.17 ลงในสมการที่ 2.18 จะได้

$$\frac{dx_A}{dt} = k_1C_{A_0} \left[(1-x_A) - \frac{(1-x_{A_e})x_A^2}{x_{A_e}^2} \right] \quad (2.19)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2.19 จะได้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$\ln \frac{x_{A_e} - (x_{A_e} - 1)x_A}{x_{A_e} - x_A} = k_1 \left(\frac{2}{x_{A_e}} - 1 \right) t \quad (2.20)$$

สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยามีความเกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของสารที่ใช้ทำปฏิกิริยา และแปรผันตามค่าคงที่ปฏิกิริยา และสำหรับปฏิกิริยามูลฐานค่าคงที่ปฏิกิริยามีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิตามสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation) ดังนี้

$$k_1 = A e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (2.21)$$

โดยที่ k_1 = ค่าคงที่ของปฏิกิริยา

A = ค่าแฟกเตอร์ความถี่ (Frequency Factor)

E_a = ค่าพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) มีหน่วยเป็น J/mol

R = ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ (Gas Constant) มีค่าเท่ากับ 8.314 J/mol·K

T = อุณหภูมิ มีหน่วยเป็น เคลวิน (K)

จากสมการที่ 2.21 สามารถเปลี่ยนรูปสมการให้เป็นสมการเชิงเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.20

$$\ln k_1 = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (2.22)$$

ดังนั้นเมื่อทำการพล็อตกราฟระหว่าง $\ln(k_1)$ กับ $1/T$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ E_a/R และมีจุดตัดแกน y เท่ากับ $-\ln A$

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาจลนพลศาสตร์เคมี

Berrios และคณะ [16] ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดโอเลอิกในน้ำมันดอกทานตะวันและเมทานอล โดยใช้กรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดโอเลอิกตั้งแต่ 10:1 ถึง 80:1 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และได้นำเสนอสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ โดยกำหนดสมมุติฐานให้ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาไปข้างหน้าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เนื่องจากเมทานอลที่ใช้ทำปฏิกิริยามีปริมาณมากเกินไปจนทำให้ความเข้มข้นของเมทานอลไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป และปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซึ่งเป็นปฏิกิริยาผันกลับเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง ซึ่งเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาของปฏิกิริยาไปข้างหน้ามีค่ามากขึ้น แต่ค่าคงที่ปฏิกิริยาของปฏิกิริยาผันกลับมีค่าน้อยมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดขึ้นน้อยมาก และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาไปข้างหน้าลดลงจาก 50.74 เป็น 44.56 กิโลจูลต่อโมล

Chengcai Song และคณะ [17] ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันระหว่างกรดโอเลอิกและเมทานอล โดยใช้ซิงค์อะซิเตต (Zinc Acetate) ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 160 – 220 องศาเซลเซียส ความดัน 435 – 1450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดโอเลอิกตั้งแต่ 1:1 – 10:1 จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดโอเลอิกจาก 1:1 ไปจนถึง 10:1 มีผลทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดโอเลอิกมากกว่าที่ 8:1 ขึ้นไป จะทำให้กรดโอเลอิกเปลี่ยนเป็นเมทิลโอเลเอตเกือบทั้งสิ้นภายในเวลา 30 นาที และได้นำเสนอสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับได้ แต่เนื่องจากปริมาณของเมทานอลที่ใช้ทำปฏิกิริยามีมากเกินไปจนทำให้ความเข้มข้นของเมทานอลไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป และสมมุติให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาผันกลับมีค่าน้อยมาก ดังนั้น

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของงานวิจัยนี้จึงเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ และค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 32.62 กิโลจูลต่อโมล

Dussadee Rattanaphra และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ น้ำมันเมล็ดเรพที่ผสมกรดไมริสติก (Myristic Acid) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักเป็นสารตั้งต้น ทำปฏิกิริยากับเมทานอลโดยใช้ซัลเฟตเซอร์โคเนีย (Sulfated Zirconia) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ความเร็วรอบในการกวนสารละลายที่ 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 4:1 – 20:1 ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 120 – 170 องศาเซลเซียส และความดัน 319 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และได้นำเสนอสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับได้ ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจะทำให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันจะทำให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้ามีค่าลดลง และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลกระทบทำให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเกิดการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน และการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา จะมีผลทำให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยาย้อนกลับมีค่าสูงขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดไมริสติกและเมทานอลโดยใช้ซัลเฟตเซอร์โคเนียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 22.57 กิโลจูลต่อโมล

Sittichai Somsai [13] ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันปาล์มและเมทานอล ที่อุณหภูมิ 200 – 300 องศาเซลเซียส ความดัน 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันปาล์มเท่ากับ 1:1 – 10:1 และได้เสนอสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยกำหนดให้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาอันดับสองและไม่กล่าวถึงปฏิกิริยาผันกลับ จากการศึกษพบว่า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจะมีผลทำให้ค่าคงที่ปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้น และค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันปาล์มและเมทานอลมีค่าประมาณ 31.5 กิโลจูลต่อโมล

Alenezi และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิชั่นแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันอิสระและเมทานอล ที่อุณหภูมิ 250 – 320 องศาเซลเซียส ความดัน 1450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระเท่ากับ 7:1 และได้นำเสนอสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับได้ จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจะมีผลทำให้ค่าคงที่ปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิชั่นซึ่งเป็นปฏิกิริยาไปข้างหน้ามีค่า 72 กิโลจูลต่อโมล และค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาย้อนกลับมีค่า 23.2 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งจะเห็นได้ว่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไปข้างหน้ามีค่ามากกว่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาย้อนกลับมากถึง 3 เท่า เนื่องจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น

งานวิจัยส่วนมากที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันได้นำเสนอสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับได้ โดยทำการทดลองเพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วนำมาพล็อตกราฟระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ เพื่อหาพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา โดยใช้สมการอาร์เรเนียสในการคำนวณ ซึ่งพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 31.5 – 72.0 กิโลจูลต่อโมล

บทที่ 3

การทดลองและการวิเคราะห์

สำหรับในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับการทดลองและวิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 หัวข้อ ได้แก่ สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลอง และวิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง รวมทั้งวิธีการคำนวณต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

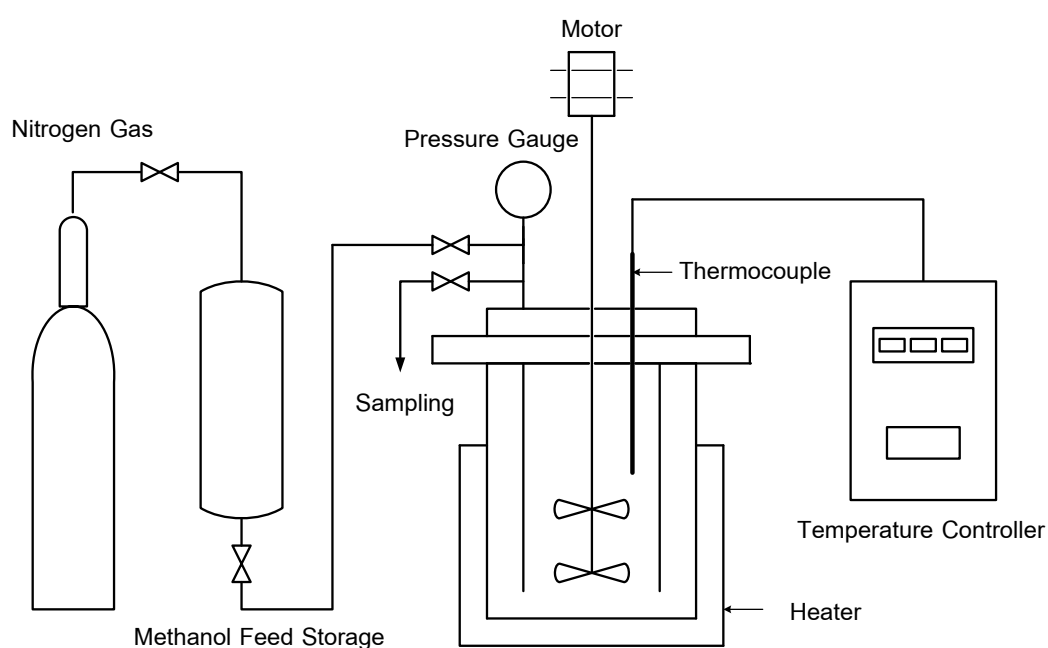
การทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองต้องใช้สารเคมีหลายชนิด โดยสารเคมีทุกชนิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ชื่อสาร	เกรด/ความบริสุทธิ์
Lauric Acid	Industrial
Methanol	Industrial
Iso-propanol	Industrial
Toluene	Industrial
Heptane	Analytical Reagent
Methyl Decanoate	Analytical Reagent
Potassium Hydroxide	Analytical Reagent
Phenolphthalein	Analytical Reagent
Nitrogen	99.99%

3.2 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 2 ลิตร ซึ่งทำจากโลหะผสมที่มีความคงทนต่อการกัดกร่อน และทำการวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ที่ต่อกับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) เพื่อที่จะควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับขั้นตอนในการทำการทดลอง และสภาวะของการทดลองของงานวิจัยนี้ ได้อธิบายในหัวข้อย่อยที่ 3.2.1 และ 3.2.2 ตามลำดับ

3.2.1 ขั้นตอนการทำการทดลอง

1. นำกรดคลอริกที่เตรียมไว้เทลงในเครื่องปฏิกรณ์
2. ไล่อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยก๊าซไนโตรเจน
3. นำเมทานอลที่เตรียมไว้เทลงในถังเก็บเมทานอล
4. ไล่อากาศภายในถังเก็บเมทานอลด้วยก๊าซไนโตรเจน

5. ให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์ จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ
6. ป้อนเมทานอลที่อยู่ในถังเก็บเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์จนหมด แล้วจึงเริ่มจับเวลา
7. เก็บตัวอย่างทุก 5 นาทีภายในเวลา 60 นาทีแรก และจากนั้นจึงเก็บที่เวลา 120, 180 และ 240 นาที
8. นำสารตัวอย่างที่เก็บได้ มาระเหยเพื่อกำจัดเมทานอลและน้ำ จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์ด้วยการไตเตรท

3.2.2 สภาวะของการทดลอง

ตารางที่ 3.2 สภาวะของการทดลอง

สภาวะของการทดลอง	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	: 100, 150, 200, 250
ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	: 800, 1000, 1200, 1400
ความเร็วรอบในการกวนสารละลาย (รอบต่อนาที)	: 50, 100, 200, 600
อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลิก	: 1:1, 2.5:1, 5:1, 10:1

3.3 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง 2 วิธี คือ เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography) เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารตั้งต้น และการไตเตรทเพื่อหาค่าของกรด (Acid Value) และค่าสะaponนิฟิเคชัน (Saponification Value)

3.3.1 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารตั้งต้น

งานวิจัยนี้ใช้กรดลิกเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารตั้งต้นได้ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี Varian รุ่น

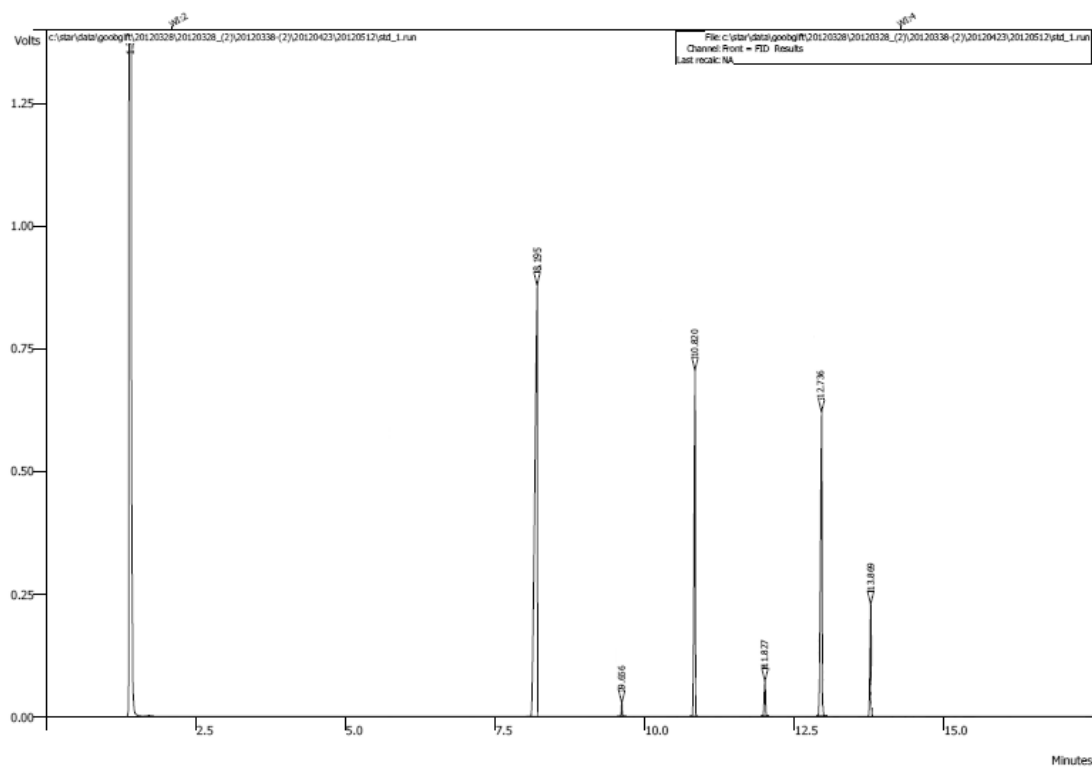
3800 ที่ประกอบด้วยคอลัมน์แบบคาปิลารี (Capillary) รุ่น Innowax m 20 เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายใน 0.32 มิลลิเมตร ความยาว 30 เมตร และความหนาของชั้นฟิล์ม 0.25 ไมโครเมตร โดยใช้ตัวตรวจวัดแบบเฟรมไอออไนซ์ (Flame Ionization Detector) ใช้ก๊าซฮีเลียม (Helium Gas) ความดันที่ 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเป็น Carrier Gas และใช้เมทิลเดคาโนเอต (Methyl Decanoate) เป็น Internal Standard และเฮปเทน (Heptane) เป็นตัวทำละลาย โดยสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์จะแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี

สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี

Inlet Temperature (°C)	: 50
Injection Volume (µl)	: 1
Split Ratio	: 100:1
Column Flow (ml/min)	: 2
Injector Temperature (°C)	: 230
Detector Temperature (°C)	: 250
Oven Program	: 80°C, Hold 5 min : 230°C, Hold 5 min

เมื่อทำการวิเคราะห์สารตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester Standard) ด้วยสภาวะที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ทำให้ทราบ Retention Time ของเมทิลเอสเทอร์แต่ละชนิด ซึ่งโครมาโตแกรม (Chromatogram) และ Retention Time จะแสดงดังรูปที่ 3.2 และตารางที่ 3.4

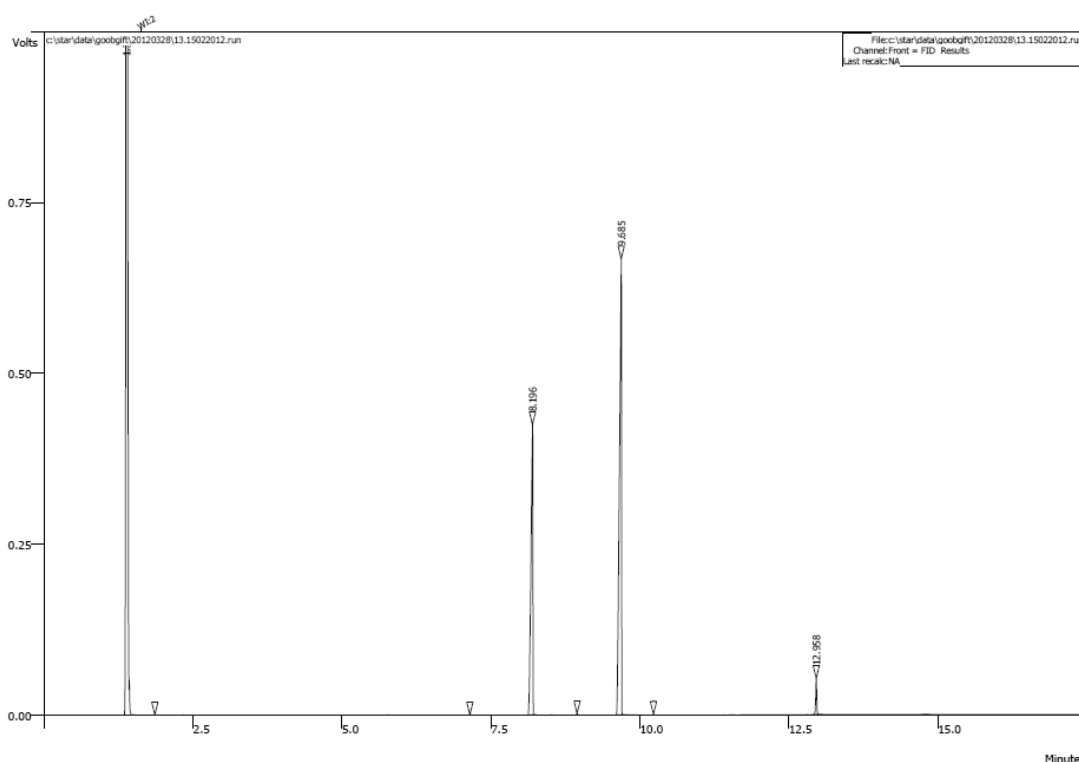


รูปที่ 3.2 โครมาโตแกรมของเมทิลเอสเทอร์จากการวิเคราะห์สารตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์

ตารางที่ 3.4 แสดง Retention Time ของเมทิลเอสเทอร์

Methyl Esters	Retention Time (min)
Heptane	1.386
Methyl Decanoate	8.195
Methyl Laurate	9.656
Methyl Myristate	10.815
Methyl Palmitate	11.835
Methyl Stearate	12.931
Methyl Oleate	13.869

จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารตั้งต้น เมื่อเปรียบเทียบ Retention Time กับสารตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์ในตารางที่ 3.4 แสดงให้เห็นว่า กรดลอริกที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยกรดไขมัน 2 ชนิด คือ กรดลอริก และกรดสเตียริก (Stearic Acid) ซึ่งจะเห็นได้จากโครมาโตแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยร้อยละขององค์ประกอบของสารตั้งต้นจะแสดงในตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.3 โครมาโตแกรมของเมทิลเอสเทอร์จากการวิเคราะห์สารตั้งต้น

ตารางที่ 3.5 องค์ประกอบของสารตั้งต้น

องค์ประกอบ	ปริมาณร้อยละขององค์ประกอบ	
กรดลอริก	C12:0	97.9
กรดสเตียริก	C18:0	2.1

กรดลอริกที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในงานวิจัยนี้มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวที่อุณหภูมิห้อง แต่จะหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งค่าของกรด และค่าสะaponนิฟิเคชันสามารถวิเคราะห์จากการไตเตรทตามมาตรฐาน AOCS Official method Cd-3d-63 และ AOCS Official Method Cd 3b-76 ตามลำดับ โดยคุณสมบัติของกรดลอริกจะแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของกรดลอริก

คุณสมบัติ	กรดลอริก
Acid Value, (mg KOH/g)	278.3
Saponification Value, (mg KOH/g)	279.1
Molecular Weight, (g/mole)	200.9
Melting Point, (°C)	43.2
Boiling Point, (°C)	298.9

3.3.2 การวิเคราะห์หาค่าของกรด

ค่าของกรด เป็นสิ่งที่บอถึงปริมาณของกรดไขมันที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ กล่าวโดยนิยาม คือปริมาณของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในหน่วยมิลลิกรัมที่ทำปฏิกิริยาเป็นกลางพอดีกับกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง 1 กรัม ดังนั้นค่าของกรดจึงสามารถบ่งบอกได้ว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นมากหรือน้อยเพียงใด สำหรับงานวิจัยนี้จะหาค่าของกรดด้วยวิธีการไตเตรทตามมาตรฐาน AOCS Official Method Cd-3D-63 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. เติมฟีนอล์ฟทาไลน์ประมาณ 2 มิลลิลิตร ลงในตัวทำละลาย 125 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นสารผสมระหว่างไอโซโพรพานอลร้อยละ 50 โดยปริมาตร และโทลูอีนร้อยละ 50 โดยปริมาตร
2. หาปริมาณน้ำหนักของสารตัวอย่างที่ต้องใช้ โดยพิจารณาจากตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้ในการไตเตรทเพื่อหาค่าของกรด

ค่าของกรด	น้ำหนักของสารตัวอย่าง (กรัม)	ค่าความคลาดเคลื่อน
0 – 1	20	0.05
1 – 4	10	0.02
4 – 15	2.5	0.01
15 – 75	0.5	0.001
มากกว่า 75	0.1	0.0002

3. ชั่งน้ำหนักของสารตัวอย่างลงในขวดรูปชมพู่
4. เติมตัวทำละลายที่เตรียมไว้ลงในขวดรูปชมพู่ โดยที่สารตัวอย่างต้องละลายหมดในตัวทำละลาย
5. ทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยเขย่าสารละลายไปจนกระทั่งเปลี่ยนเป็นสีชมพู ซึ่งสีชมพูจะปรากฏนานประมาณ 30 วินาที แล้วบันทึกปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป
6. ทำการไตเตรทตัวทำละลายที่เตรียมไว้ โดยที่ไม่ใส่สารตัวอย่าง เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ

3.3.3 การวิเคราะห์หาค่าสะaponนิฟิเคชัน

ค่าสะaponนิฟิเคชัน คือ จำนวนของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในหน่วยมิลลิกรัมที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ (Hydrolyze) น้ำมันจำนวน 1 กรัมได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งค่าสะaponนิฟิเคชันสามารถใช้บอกขนาดโมเลกุล หรือน้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของน้ำมันนั้นๆ สำหรับงานวิจัยนี้จะหาค่าสะaponนิฟิเคชันด้วยวิธีการไตเตรทตามมาตรฐาน AOCS Official Method Cd-3b-76 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่
2. เติมน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในแอลกอฮอล์ 50 มิลลิลิตร
4. ทำซ้ำในข้อ 2 และ 3 ในขวดรูปชมพู่อีก 1 ขวด โดยไม่ใส่สารตัวอย่าง เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ
5. นำขวดรูปชมพู่ไปต่อเข้ากับคอนเดนเซอร์ (Condenser) และให้ความร้อน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6. เติมนีลอฟฟาทาลีนประมาณ 1 มิลลิลิตร สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู จากนั้นจึงไตเตรทด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.5 N จนกระทั่งสีชมพูจางหายไป แล้วบันทึกปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไป

3.4 วิธีการคำนวณต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย

การคำนวณเพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง จะทำให้ทราบข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับทั้งสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ของงานวิจัยนี้ ได้แก่ ค่าของกรด ค่าสะaponนิฟิเคชัน มวลโมเลกุล และค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น เป็นต้น ซึ่งวิธีการคำนวณต่างๆ พร้อมทั้งตัวอย่างการคำนวณ จะถูกอธิบายไว้ในหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

3.4.1 การคำนวณค่าของกรด

การคำนวณค่าของกรดตามมาตรฐาน AOCS Official Method Cd-3D-63 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$AV = \frac{(A - B) \times N \times 56.1}{W} \quad (3.1)$$

โดยที่ AV คือ ค่าของกรด (Acid Value)

A คือ ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป มีหน่วยเป็น มิลลิลิตร

B คือ ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไตเตรทกับตัวทำละลายที่ไม่มีสารตัวอย่าง (Blank) มีหน่วยเป็น มิลลิลิตร

N คือ ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

W คือ น้ำหนักของสารตัวอย่าง มีหน่วยเป็น กรัม

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าของกรดของกรดลอริกที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ซึ่งมีค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ = 6.2 มิลลิลิตร
- ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ไตเตรท Blank = 0.2 มิลลิลิตร
- ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ = 0.083 โมลต่อลิตร
- น้ำหนักของสารตัวอย่าง = 0.0999 กรัม

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.1 จะได้ดังนี้

$$AV = \frac{(6.2 - 0.2) \times 0.083 \times 56.1}{0.1004} = 278.3$$

3.4.2 การคำนวณค่าสะaponนิฟิเคชัน

การคำนวณค่าสะaponนิฟิเคชันตามมาตรฐาน AOCS Official Method Cd-3b-76 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$SV = \frac{(B - S) \times N \times 56.1}{W} \quad (3.2)$$

โดยที่ SV คือ ค่าสะaponนิฟิเคชัน (Saponification Value)

B คือ ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไตเตรทกับตัวทำละลายที่ไม่
มีสารตัวอย่าง มีหน่วยเป็น มิลลิลิตร

S คือ ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ที่ใช่ไป มีหน่วยเป็น มิลลิลิตร

N คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

W คือ น้ำหนักของสารตัวอย่าง มีหน่วยเป็น กรัม

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าสะaponนิฟิเคชันของกรดคลอริกที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ซึ่งมีค่าต่างๆ
ดังต่อไปนี้

- ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก = 19.4 มิลลิลิตร
- ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ไตเตรท Blank = 29.4 มิลลิลิตร
- ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก = 1.0 โมลต่อลิตร
- น้ำหนักของสารตัวอย่าง = 2.0098 กรัม

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.2 จะได้ดังนี้

$$SV = \frac{(29.4 - 19.4) \times 1.0 \times 56.1}{2.0098} = 279.1$$

3.4.3 การคำนวณหามวลโมเลกุล

เมื่อนำกรดลอริกที่ใช้เป็นสารตั้งต้นมาวิเคราะห์โดยการไตเตรท เพื่อหาค่าของกรด และค่าสะปอนนิฟิเคชัน จะสามารถคำนวณหามวลโมเลกุลได้จากสมการที่ 3.3

$$MW = \frac{56108 - 12.67 \times (SV - AV)}{SV} \quad (3.3)$$

โดยที่ MW คือ มวลโมเลกุลของกรดลอริก

SV คือ ค่าสะปอนนิฟิเคชัน

AV คือ ค่าของกรด

ตัวอย่างการคำนวณหามวลโมเลกุลของกรดลอริกที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ซึ่งมีค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ค่าสะปอนนิฟิเคชันของกรดลอริก = 279.1 มิลลิลิตร
- ค่าของกรดของกรดลอริก = 278.3 มิลลิลิตร

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.3 จะได้ดังนี้

$$MW = \frac{56108 - 12.67 \times (279.1 - 278.3)}{279.1} = 200.9$$

3.4.4 การคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น

ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริก สามารถคำนวณได้จากผลการวิเคราะห์ค่าของกรดด้วยการไตเตรท แล้วนำค่าของกรดที่ได้มาคำนวณโดยใช้สมการที่ 3.4

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (Conversion)} = \frac{AV_0 - AV_t}{AV_0} \times 100 \quad (3.4)$$

โดยที่ AV_0 คือ ค่าของกรดของสารตั้งต้นที่เวลา $t = 0$

AV_t คือ ค่าของกรดของสารตั้งต้นที่เวลานั้นๆ

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่เวลา 240 นาที ที่สภาวะอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกที่ 5:1 ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ซึ่งมีค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ค่าของกรดที่เวลา $t = 0$ มีค่าเท่ากับ 278.3
- ค่าของกรดที่เวลา $t = 240$ มีค่าเท่ากับ 15.55

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.4 จะได้ดังนี้

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (Conversion)} = \frac{278.30 - 15.55}{278.30} \times 100 = 94.41$$

นอกจากนี้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริก ยังสามารถคำนวณได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

1) การคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง (Response Factor) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.5

$$Rf. = \frac{\text{พื้นที่ของเมทิลเอสเทอร์} \times \text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง (Weight of I.S.)}}{\text{น้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์} \times \text{พื้นที่ของสารตัวอย่าง (Area of I.S.)}} \quad (3.5)$$

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง ซึ่งมีค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

- พื้นที่ของเมทิลลอเรต = 18721
- น้ำหนักของเมทิลลอเรต = 0.00053
- พื้นที่ของเมทิลสเตียเรต = 804828
- น้ำหนักของเมทิลสเตียเรต = 0.02261
- พื้นที่ของสารตัวอย่าง = 1300677
- น้ำหนักของสารตัวอย่าง = 0.03654

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.5 จะได้ดังนี้

$$\text{Rf. of Methyl Laurate} = \frac{18721 \times 0.03654}{0.00053 \times 1300677} = 1.00000$$

$$\text{Rf. of Methyl Stearate} = \frac{804828 \times 0.03654}{0.02261 \times 1300677} = 1.00000$$

2) การคำนวณหาปริมาณของสารประกอบประเภทเมทิลเอสเทอร์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.6

$$\text{ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์} = \frac{\text{พื้นที่ของเมทิลเอสเทอร์} \times \text{น้ำหนักของสารตัวอย่างพื้นที่ของสารตัวอย่าง}}{\text{แฟกเตอร์ตอบสนอง (Rf.)}} \quad (3.6)$$

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณสารประกอบประเภทเมทิลเอสเทอร์ของสารตัวอย่างที่เวลา 240 นาที ที่สภาวะอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกที่ 5:1 ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ซึ่งมีค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

- พื้นที่ของเมทิลลอเรต = 1359042
- พื้นที่ของเมทิลสเตียเรต = 24012
- พื้นที่ของสารตัวอย่าง = 916471
- น้ำหนักของสารตัวอย่าง = 0.03683
- แฟกเตอร์ตอบสนองของเมทิลลอเรต = 1.00000
- แฟกเตอร์ตอบสนองของเมทิลสเตียเรต = 1.00000

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.6 จะได้ดังนี้

$$\text{ปริมาณของเมทิลลอเรต (กรัม)} = \frac{1359042 \times 0.03683}{916471 \times 1.0000} = 0.05461$$

$$\text{ปริมาณของเมทิลสเตียเรต (กรัม)} = \frac{24012 \times 0.03683}{916471 \times 1.0000} = 0.00096$$

3) การคำนวณหาร้อยละของสารประกอบประเภทเมทิลเอสเทอร์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.7

$$\text{ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์} = \frac{\text{น้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์}}{\text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง}} \times 100 \quad (3.7)$$

ตัวอย่างการคำนวณหาร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ของสารตัวอย่างที่เวลา 240 นาที ที่สภาวะอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกที่ 5:1 ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ซึ่งมีค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

- น้ำหนักของเมทิลลอเรต (กรัม) = 0.05461
- น้ำหนักของเมทิลสเตียเรต (กรัม) = 0.00096
- น้ำหนักของสารตัวอย่าง = 0.05900

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.7 จะได้ดังนี้

$$\text{ร้อยละของเมทิลลอเรต} = \frac{0.05461}{0.05900} \times 100 = 92.57$$

$$\text{ร้อยละของเมทิลสเตียเรต} = \frac{0.00096}{0.05900} \times 100 = 1.64$$

$$\text{ผลรวมร้อยละของเมทิลเอสเทอร์} = 92.57 + 1.64 = 94.21$$

4) การคำนวณหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.8

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลง} = \frac{\text{ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ของสารตัวอย่าง}}{\text{ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์}} \times 100 \quad (3.8)$$

ตัวอย่างการคำนวณหาร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งมีค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ของสารตัวอย่างที่เวลา 240 นาที ที่สภาวะอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกที่ 5:1 ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที = 94.21
 - ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดลอริกที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ซึ่งประกอบด้วย กรดลอริกร้อยละ 97.85 และกรดสเตียริกร้อยละ 2.08 โดยน้ำหนัก โดยมีผลรวมของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ = 99.93
- เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.8 จะได้ดังนี้

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลง} = \frac{94.21}{99.93} \times 100 = 94.27$$

จากการคำนวณหาร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริก ที่เวลา 240 นาที ที่สภาวะอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกที่ 5:1 ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที พบว่า การคำนวณจากผลการวิเคราะห์ค่าของกรดด้วยการไทเตรท จะได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกเท่ากับ 94.41 และการคำนวณจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกเท่ากับ 94.27 ซึ่งผลการคำนวณจากวิธีทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกจากผลการวิเคราะห์ค่าของกรดด้วยการไทเตรท

บทที่ 4

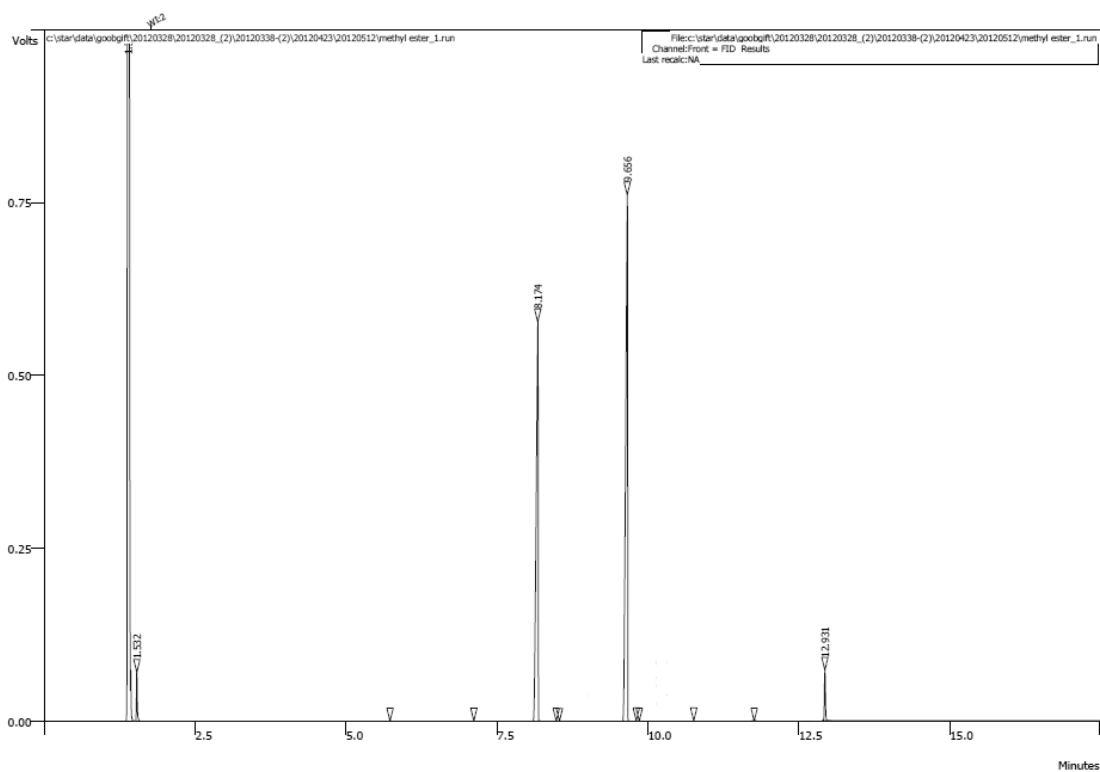
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันแบบไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกรดลอรริกและเมทานอล พร้อมทั้งศึกษาแบบจำลองที่เหมาะสมกับปฏิกิริยา โดยทำการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการศึกษา ได้แก่ ความเร็วรอบของการกวนสารละลาย ความดัน อุณหภูมิ และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอรริก ซึ่งผลการทดลองและการอภิปรายผลจะถูกนำเสนอตามลำดับดังนี้

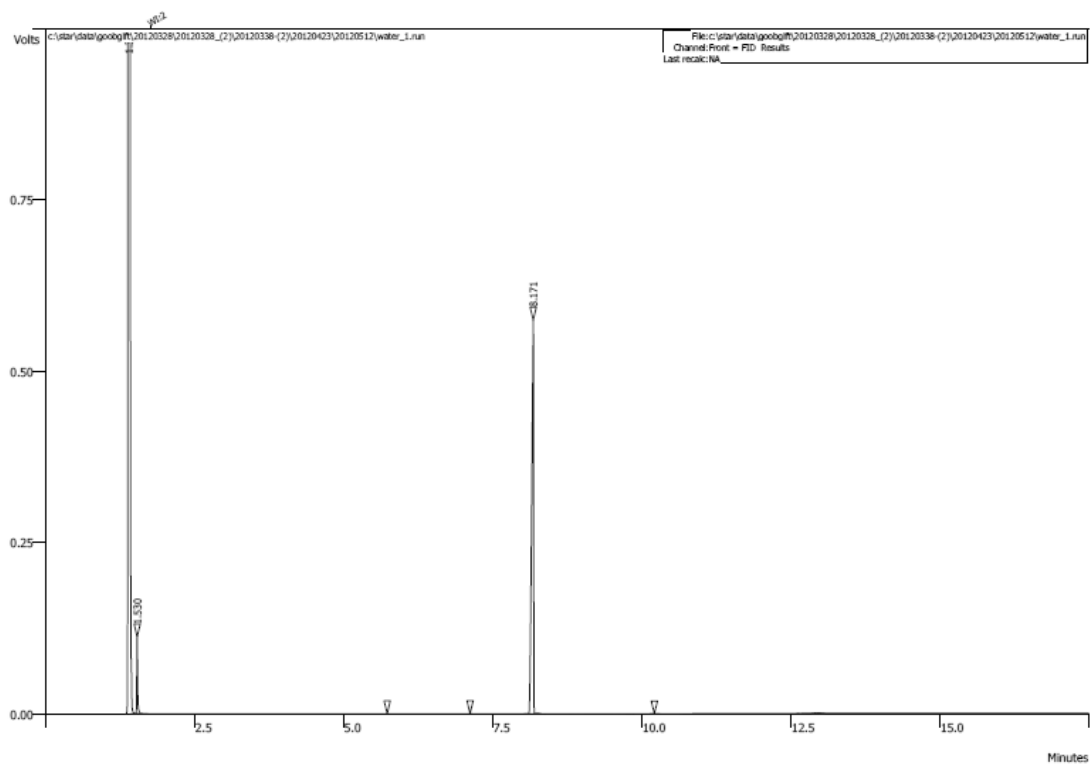
- 4.1 ผลกระทบของความเร็วยรอบของการกวนสารละลาย
- 4.2 ผลกระทบของความดันในการทำปฏิกิริยา
- 4.3 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอรริก
- 4.4 ผลกระทบของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา
- 4.5 แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชัน
- 4.6 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันแบบไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา

เนื่องจากการทดลองในแต่ละครั้งอาจเกิดความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย และค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อน เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้มีความน่าเชื่อถือ โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกเท่ากับ 5:1 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และความเร็วรอบในการกวนสารละลายที่ 600 รอบต่อนาที ผลการทดลองที่ได้แสดงเป็นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริก เพื่อแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นที่เวลาต่างๆ และเนื่องจากการทดลองในแต่ละครั้งมีความเข้มข้นเริ่มต้นไม่เท่ากัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงคำนวณผลการทดลองให้เป็นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกโดยใช้สมการที่ 3.4 เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งผลการทดลองจากการทำการทดลองซ้ำจะแสดงอยู่ในภาคผนวก ก โดยค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 3.26

สารตัวอย่างที่ได้จากการทดลองโดยไม่ผ่านการระเหยน้ำและเมทานอลจะแยกออกจากกันเป็น 2 เฟสอย่างชัดเจน คือ เฟสของเมทิลเอสเทอร์ และเฟสของน้ำ ซึ่งเมื่อนำสารตัวอย่างทั้ง 2 เฟสไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีจะได้โครมาโตแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งจากการวิเคราะห์สารตัวอย่างไม่พบผลิตภัณฑ์อื่น นอกจากเมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา และเมทิลเอสเทอร์ 2 ชนิด คือ เมทิลลอเรต และเมทิลสเตียเรต ซึ่งเกิดขึ้นจากองค์ประกอบทั้งสองชนิดของสารตั้งต้น แสดงให้เห็นว่าไม่มีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น และนอกจากนี้ยังพบว่า เมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาจะละลายอยู่ในเฟสของน้ำมากกว่าในเฟสของเมทิลเอสเทอร์ โดยที่เฟสของน้ำจะมีเมทานอลละลายอยู่ร้อยละ 19.79 ส่วนในเฟสของเมทิลเอสเทอร์จะมีเมทานอลละลายอยู่ร้อยละ 12.85 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.1 โครมาโตแกรมจากการวิเคราะห์เฟสเมทิลเอสเทอร์ของสารตัวอย่าง



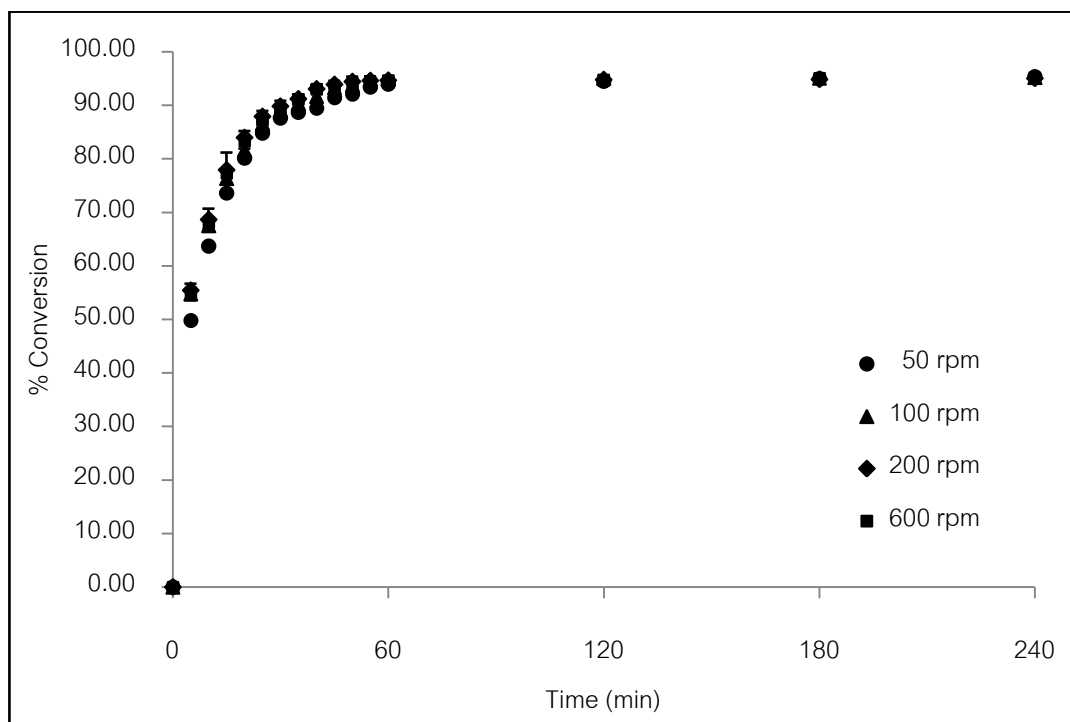
รูปที่ 4.2 โครมาโตแกรมจากการวิเคราะห์เฟสน้ำของสารตัวอย่าง

4.1 ผลกระทบของความเร็รรอบของการกวนสารละลาย

การศึกษผลกระทบของความเร็รรอบที่ใช้ในการกวนสารละลาย ทำการทดลองที่ ความเร็รรอบ 50, 100, 200 และ 600 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลิกที่ 5:1 ผลการทดลองที่ได้จะ แสดงอยู่ในภาคผนวก ข ซึ่งเมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณเป็นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ กรดลิก จะแสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลิกที่เวลาต่างๆ โดยใช้ความเร็รรอบ 50, 100, 200 และ 600 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลิก			
	50 rpm	100 rpm	200 rpm	600 rpm
0	0.00	0.00	0.00	0.00
5	49.82	54.78	55.41	55.02
10	63.69	67.49	68.66	68.09
15	73.64	76.32	77.93	77.34
20	80.14	81.62	83.97	83.38
25	84.78	86.61	87.91	87.24
30	87.61	89.07	89.83	89.17
35	88.71	90.38	91.17	91.13
40	89.49	91.67	93.07	92.97
45	91.45	93.31	93.91	93.17
50	92.07	93.81	94.45	94.06
55	93.43	94.87	94.62	94.24
60	93.95	94.91	94.65	94.60
120	94.46	95.05	94.78	94.68
180	94.97	95.06	94.82	95.02
240	95.30	95.21	95.02	95.03



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลิกและเวลา โดยใช้ความเร็วรอบ 50, 100, 200 และ 600 รอบต่อนาที

ผลการทดลองในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลิกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 30 นาทีแรก และที่เวลา 60 นาทีเป็นต้นไป ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลิกไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีก เนื่องจากปฏิกิริยาเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยที่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 30 นาทีแรก และดำเนินต่อไปจนเริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลา 60 นาที โดยร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลิกที่สภาวะสมดุลมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก จากข้อมูลดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tanaeawan Pinnarat [19] ที่ได้กล่าวว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้

เมื่อทำการเพิ่มความเร็วรอบในการกวนสารละลายจาก 50 ไปจนถึง 600 รอบต่อนาที มีผลทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลิกในช่วงเวลา 60 นาทีแรกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่หลังจากนั้นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลิกจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก จนไม่มีความแตกต่างที่เห็นได้ชัด ซึ่งค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลิกที่ความเร็วรอบ 200

และ 600 รอบต่อนาที มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ดังนั้นจึงสรุปว่า การเพิ่มความเร็วรอบในการกวนสารละลายไม่ใช่ตัวแปรสำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริก เพราะกรดลอริกและเมทานอลที่ใช้เป็นสารตั้งต้นสามารถละลายเข้ากันได้ดีเป็นเฟสเดียวกัน

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Alenezi [14] ซึ่งได้ทำการศึกษาผลกระทบของความเร็วยรอบในการกวนสารละลายของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กรดไขมันอิสระและเมทานอลเป็นสารตั้งต้น ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ความดัน 1450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระที่ 7:1 และใช้ความเร็วรอบที่ 430, 850 และ 1630 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย พบว่าการทดลองที่ใช้ความเร็วรอบในการกวนสารละลายที่แตกต่างกัน ทำให้ค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีค่าไม่แตกต่างกัน

ดังนั้นการศึกษาค่าตัวแปรอื่นๆ ต่อไป จึงเลือกใช้ความเร็วรอบของการกวนสารละลายที่ 200 รอบต่อนาที เพื่อให้สารละลายทั้งหมดที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิเท่ากัน

4.2 ผลกระทบของความดันในการทำปฏิกิริยา

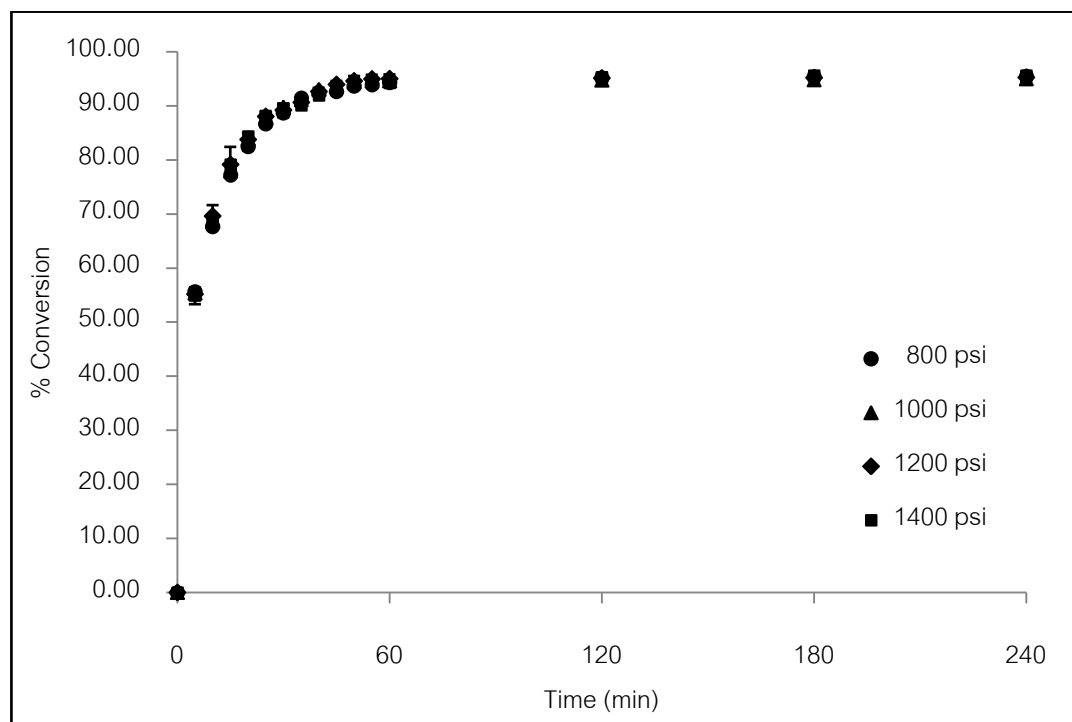
การศึกษาผลกระทบของความดันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ทำการทดลองที่ความดัน 800, 1000, 1200 และ 1400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก 5:1 และความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ผลการทดลองที่ได้จะแสดงอยู่ในภาคผนวก ค ซึ่งเมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณเป็นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริก จะแสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4

ผลการทดลองในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และดำเนินต่อไปจนเริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลา 60 นาที โดยที่สภาวะสมดุลค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกไม่มีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มความดันจาก 800 ไปจนถึง 1400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่ได้มีความแตกต่างกันน้อยมาก และผลการทดลองที่ได้อยู่ในช่วงของค่าร้อยละความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึง

สรุปว่า การเพิ่มความดันจาก 800 ไปจนถึง 1400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไม่มีผลกระทบต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริก เนื่องจากที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างกรดลอริกและเมทานอลเกิดขึ้นในสถานะที่เป็นของเหลว ความดันที่มากกว่า 800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จึงไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ โดยใช้ความดัน 800, 1000, 1200 และ 1400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

เวลา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริก			
	800 psi	1000 psi	1200 psi	1400 psi
0	0.00	0.00	0.00	0.00
5	55.66	55.41	55.14	54.95
10	67.64	68.66	69.61	69.01
15	77.19	77.93	79.17	79.07
20	82.45	83.97	83.76	84.29
25	86.69	87.91	88.01	87.97
30	88.65	89.83	89.24	89.50
35	91.48	91.17	90.62	90.08
40	92.33	93.07	92.65	91.93
45	92.67	93.91	93.93	93.07
50	93.64	94.45	94.62	93.96
55	93.88	94.62	94.95	94.19
60	94.30	94.65	95.04	94.27
120	95.22	94.78	95.15	95.33
180	95.39	94.82	95.20	95.53
240	95.42	95.02	95.22	95.60



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกและเวลา โดยใช้ความดัน 800, 1000, 1200 และ 1400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sittichai Somsai [13] ที่ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความดันของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันปาล์มและเมทานอล โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความดัน 500 และ 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่า เมื่อใช้ความดันต่างกันในการทำปฏิกิริยา ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันปาล์มมีค่าไม่แตกต่างกัน

4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

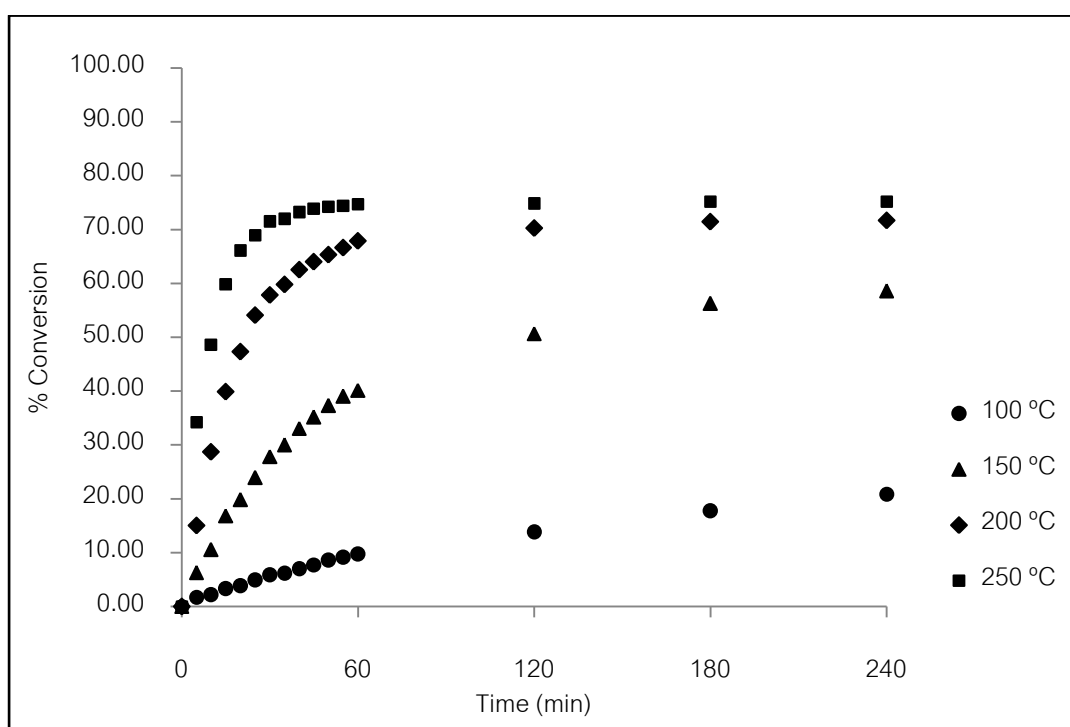
การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกที่ 1:1 ความดันในการทำปฏิกิริยาที่ 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และใช้ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ผลการทดลองที่ได้จะแสดงอยู่ในภาคผนวก ง ซึ่งเมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณเป็นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริก จะแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ โดยใช้อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริก			
	100°C	150°C	200°C	250°C
0	0.00	0.00	0.00	0.00
5	1.71	6.26	15.00	34.23
10	2.15	10.57	28.68	48.65
15	3.30	16.82	39.86	59.86
20	3.82	19.81	47.31	66.09
25	4.91	23.92	54.11	68.96
30	5.84	27.84	57.85	71.49
35	6.14	30.01	59.80	71.98
40	6.96	33.06	62.54	73.23
45	7.72	35.17	64.01	73.90
50	8.57	37.31	65.35	74.26
55	9.14	39.02	66.63	74.46
60	9.71	40.14	67.87	74.74
120	13.84	50.66	70.30	74.83
180	17.75	56.28	71.44	75.20
240	20.87	58.59	71.67	75.21

ผลการทดลองในรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 100 ไปจนถึง 250 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และยังทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่สภาวะสมดุลมีค่ามากขึ้นด้วย โดยการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จะได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกมากที่สุด และจากการเพิ่มอุณหภูมิยังทำให้ความชันของกราฟในช่วงเริ่มต้นของปฏิกิริยามีค่ามากขึ้น กล่าวคือ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ดังนั้นจึงสรุปว่า

อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น และทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่สภาวะสมดุลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างกรดลอริกและเมทานอลเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน สอดคล้องกับ Ozbay และคณะ [20] ที่ได้กล่าวว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับปฏิกิริยาดูดความร้อน จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกและเวลา โดยใช้อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส

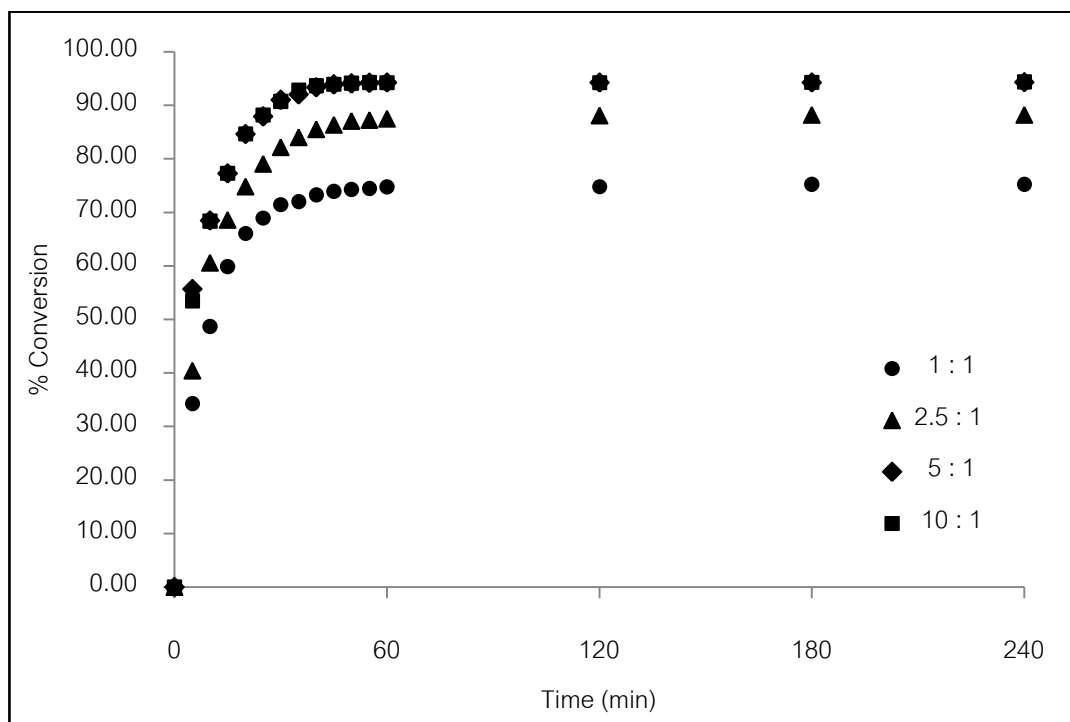
ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chengcai Song [17] ที่ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบบของอุณหภูมิของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างกรดโอเลอิกและเมทานอล โดยใช้ซิงค์อะซิเตทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 160 – 220 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา จะทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่สภาวะอุณหภูมิสูง จะทำให้กรดไขมันและเมทานอลสามารถละลายเข้ากันได้ดี จึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น

4.4 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก

การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก ทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกที่ 1:1, 2.5:1, 5:1 และ 10:1 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความดันที่ 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และใช้ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ผลการทดลองที่ได้จะแสดงอยู่ในภาคผนวก ง ซึ่งเมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณเป็นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริก จะแสดงได้ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกที่ 1:1, 2.5:1, 5:1 และ 10:1

เวลา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริก			
	1:1	2.5:1	5:1	10:1
0	0.00	0.00	0.00	0.00
5	34.23	40.44	55.70	53.45
10	48.65	60.55	68.50	68.36
15	59.86	68.60	77.29	77.35
20	66.09	74.83	84.62	84.71
25	68.96	79.05	87.89	88.24
30	71.49	82.18	91.00	90.71
35	71.98	84.02	92.02	92.79
40	73.23	85.50	93.35	93.65
45	73.90	86.38	93.87	93.97
50	74.26	87.05	94.05	94.13
55	74.46	87.22	94.17	94.25
60	74.74	87.47	94.25	94.26
120	74.83	88.09	94.27	94.26
180	75.20	88.19	94.27	94.34
240	75.21	88.20	94.30	94.36



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกและเวลา โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกที่ 1:1, 2.5:1, 5:1 และ 10:1

ผลการทดลองในรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 30 นาทีแรก และดำเนินต่อไปจนเริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลา 60 นาที โดยที่สภาวะสมดุลมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกแตกต่างกัน โดยค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่สภาวะสมดุลจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเมทานอลที่เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกตั้งแต่ 1:1 ไปจนถึง 10:1 มีผลทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และยังทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่สภาวะสมดุลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกจาก 5:1 เป็น 10:1 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก และค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่สภาวะสมดุลยังมีค่าใกล้เคียงกันอีกด้วย ดังนั้นจึงสรุปว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกจาก 1:1 ไปจนถึง 5:1 มีผลกระทบทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเมทานอลจะเป็นการเปลี่ยนสมดุลของปฏิกิริยาให้เลื่อนไปทางขวา แต่การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลจาก 5:1

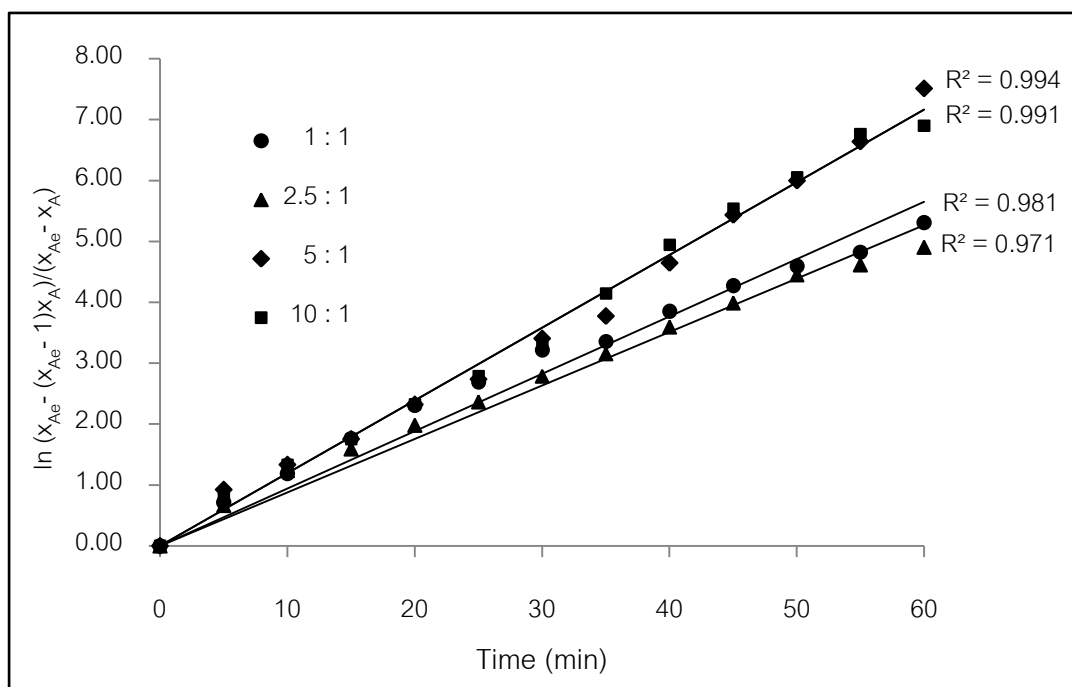
เป็น 10:1 ไม่มีผลทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลิกเกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากปริมาณของเมทานอลที่มีมากเกินไป ทำให้ความเข้มข้นของเมทานอลเสมือนว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Duangkamol Yujaroen และคณะ [11] ที่ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันปาล์มที่ 1:1 – 6:1 ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 250 และ 300 องศาเซลเซียส ความดันประมาณ 1450 – 2175 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันปาล์ม มีผลทำให้ค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ที่สภาวะสมดุลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

นอกจากนี้ผลการทดลองที่ได้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kusdiana และ Saka [15] ที่ได้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดโอเลอิกตั้งแต่ 1:1 – 40:1 ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กรดโอเลอิกและเมทานอลเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา พบว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดโอเลอิกตั้งแต่ 1:1 จนถึง 3:1 จะทำให้ค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดโอเลอิกมากกว่า 3:1 ขึ้นไป ค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์จะไม่มี การเปลี่ยนแปลง

4.5 แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

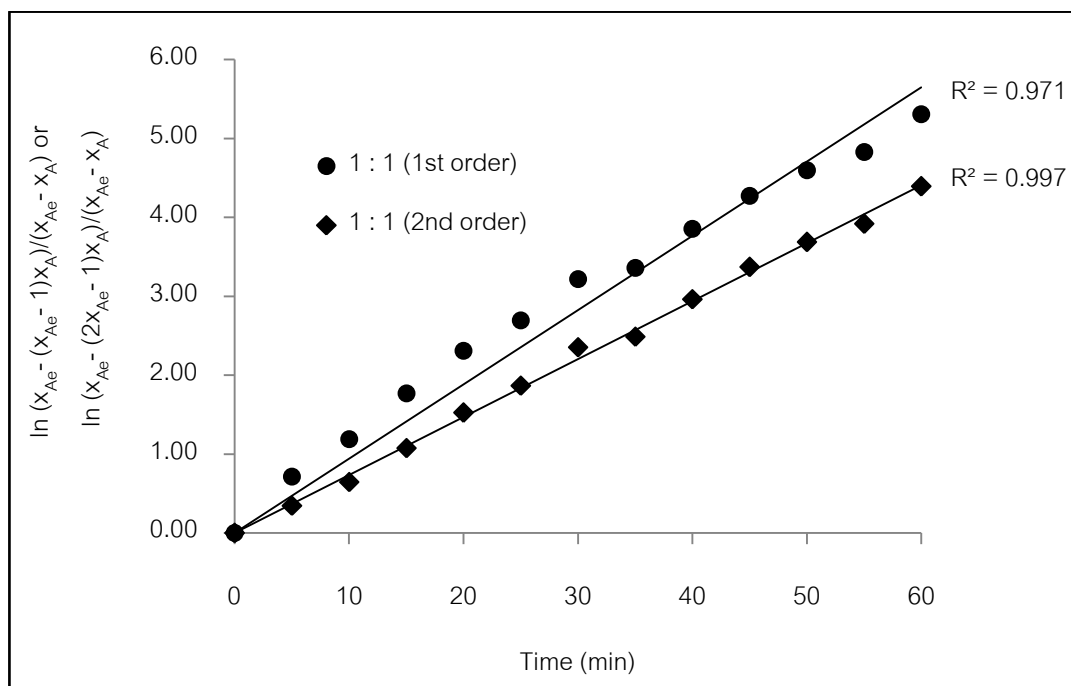
จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดลิกและเมทานอลดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้ทราบว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ และเกิดขึ้นในเฟสเดียวกัน นอกจากนี้ยังทราบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลิกมากกว่า 5:1 ขึ้นไป จะไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากการนำผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.4 มาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.20 ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลองและเวลา

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยการเพิ่ม อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลوريคจาก 1:1 ไปจนถึง 10:1 มาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.20 จะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ซึ่งกราฟที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลوريคมากกว่า 2.5:1 ขึ้นไป จะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมากกว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลوريค 1:1 โดยกราฟที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลوريคที่ 5:1 และ 10:1 จะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมากที่สุด

และเมื่อได้นำข้อมูลของการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลوريคที่ 1:1 มาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.13 และ 2.20 ซึ่งเป็นแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับได้ และปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบผันกลับได้ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบอันดับของปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4.8



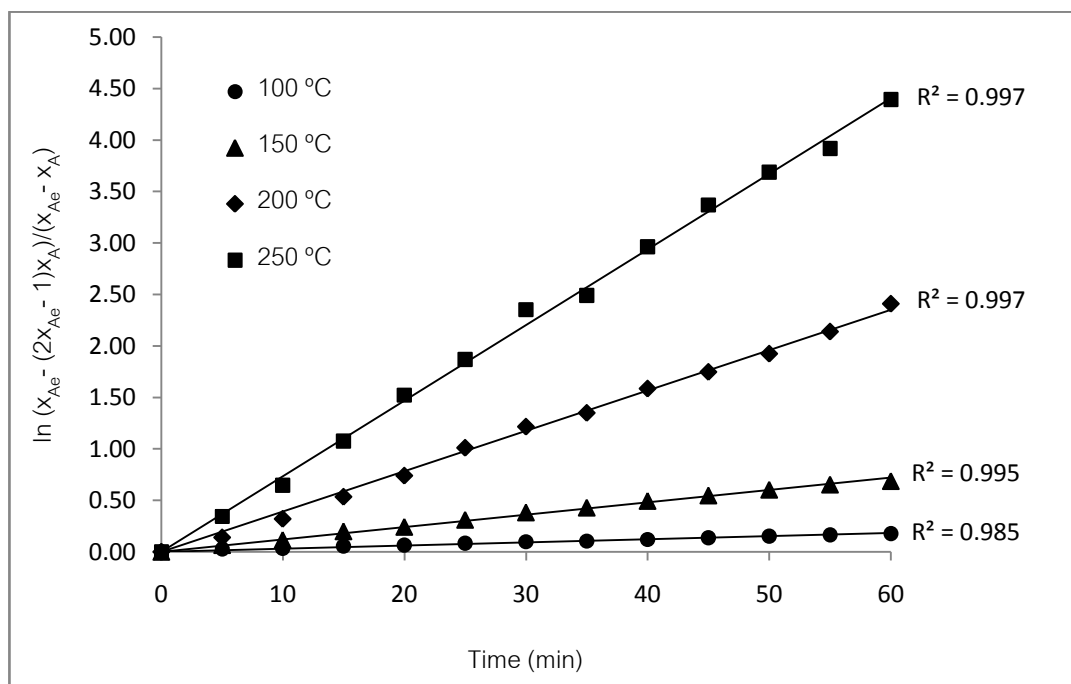
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแบบจำลองที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองตามสมการที่ 2.13 มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมากกว่าแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งตามสมการที่ 2.20 ดังนั้นจึงสรุปว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกรดลอริกและเมทานอลเป็นปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับได้ ซึ่งเกิดขึ้นในเฟสเดียวกัน และเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกมากกว่า 5:1 ขึ้นไป จะไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

4.6 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันในวิจัยนี้ จะทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งตามที่ได้กล่าวในบทที่ 2 มาแล้วว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาแปรผันตามความเข้มข้นของสารที่ใช้ทำปฏิกิริยาและค่าคงที่ปฏิกิริยา โดยที่ค่าคงที่ปฏิกิริยามีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิตามสมการอาร์เรเนียส

ดังนั้นเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 4.3 มาพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ของแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองตามสมการที่ 2.13 จะได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสอง
ที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่ากราฟมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลองที่กำหนดไว้ และค่าความชันของกราฟที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถนำมาคำนวณหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้ โดยค่าความชันของกราฟ (k') ที่อุณหภูมิต่างๆ จะแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความชันของกราฟที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความชันของกราฟ (k')
100	0.003
150	0.012
200	0.039
250	0.073

จากตารางที่ 4.5 ทำให้ทราบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามากขึ้น ความชันของกราฟจะมีค่ามากขึ้นด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น และเมื่อพิจารณาสมการที่ 2.13 จะเห็นได้ว่า ค่าความชันของกราฟ (k') มีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้า (k_1) ดังสมการที่ 4.1

$$k' = 2C_{A_0} k_1 \left(\frac{1}{x_{A_e}} - 1 \right) \quad (4.1)$$

โดยที่ k' = ความชันของกราฟ

x_{A_e} = ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่สภาวะสมดุล

ค่าคงที่ปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุล (K_e) จากผลการทดลองสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10 ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าคงที่ปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่ปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุล (โมล ลิตร ⁻¹)
100	1.4938
150	4.1221
200	6.6122
250	9.0000

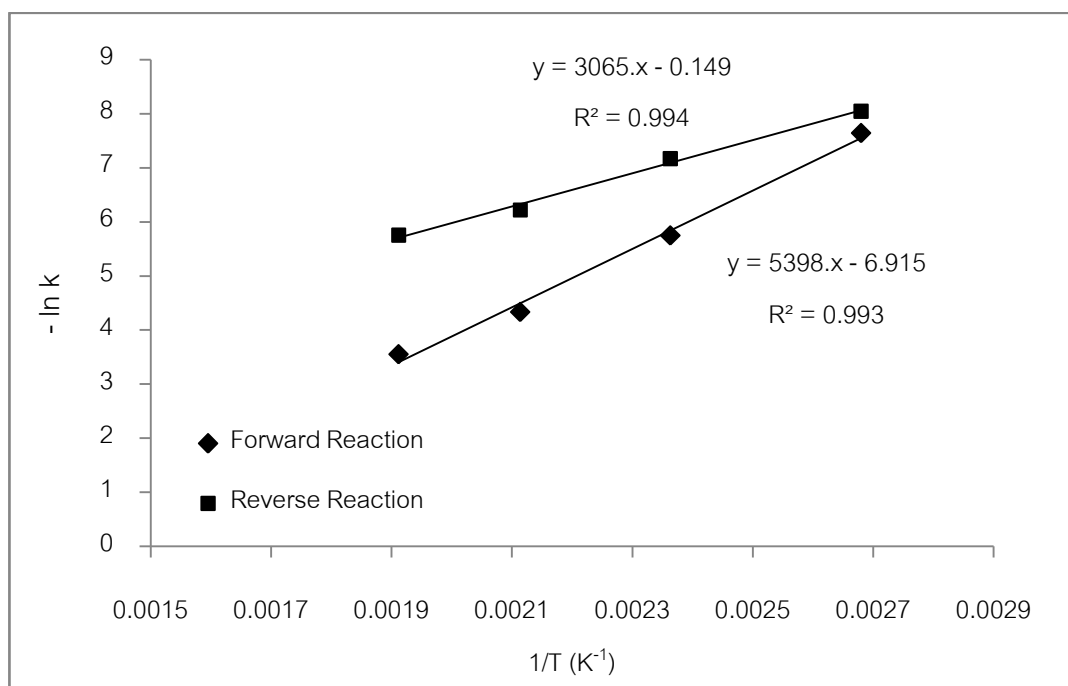
จากตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา จะทำให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าคงที่ปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลมีค่ามากกว่า 1 ซึ่งหมายถึง ในระบบมีผลิตภัณฑ์มากกว่าสารตั้งต้น

ดังนั้นค่าคงที่ปฏิกิริยาไปข้างหน้า (k_1) ที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาย้อนกลับ (k_{-1}) ได้จากความสัมพันธ์ของค่าคงที่ปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลตามสมการที่ 2.10 ซึ่งจะแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่ปฏิกิริยาไปข้างหน้า (นาที่ ⁻¹)	ค่าคงที่ปฏิกิริยาย้อนกลับ (ลิตร โมล ⁻¹ นาที่ ⁻¹)
100	0.000477	0.000320
150	0.003172	0.000770
200	0.013058	0.001975
250	0.028516	0.003168

จากตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามากขึ้น จะทำให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้ามีค่ามากขึ้นด้วย ซึ่งเมื่อนำค่าคงที่ของปฏิกิริยาในตารางที่ 4.6 มาพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.22 จะได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่ปฏิกิริยากับอุณหภูมิตามสมการอาร์เรเนียส

จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า ค่าคงที่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยาย้อนกลับตามความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสมีลักษณะเป็นเส้นตรงตามสมการที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

$$y = 5398(x) - 6.915 \quad (4.2)$$

$$y = 3065(x) - 0.149 \quad (4.3)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 4.2 และ 4.3 ความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ E_a/R และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $-\ln A$ ดังนั้นพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไปข้างหน้ามีค่า 44.87 กิโลจูลต่อโมล และพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาย้อนกลับมีค่า 25.48 กิโลจูลต่อโมล โดยแฟกเตอร์ความถี่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้ามีค่าเท่ากับ 1007 และแฟกเตอร์ความถี่ของปฏิกิริยาย้อนกลับมีค่าเท่ากับ 1.16 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Alenezi และคณะ [14] ที่ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันอิสระและเมทานอล พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจะมีผลทำให้ค่าคงที่ปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาไปข้างหน้ามีค่า 72 กิโลจูลต่อโมล และค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาย้อนกลับมีค่า 23.2 กิโลจูลต่อโมล

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกรดลอริกและเมทานอล สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การเพิ่มความเร็วยุโรปที่ใช้ในการกวนสารละลายมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งการกวนสารละลายด้วยความเร็วยุโรปมากกว่า 200 รอบต่อนาที จะไม่มีผลต่อปฏิกิริยา
2. การเพิ่มความดันตั้งแต่ 800 ไปจนถึง 1400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นในเฟสของเหลว
3. การเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น และดำเนินเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น
4. การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น แต่การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกตั้งแต่ 5:1 ขึ้นไป จะไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา
5. ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกรดลอริกและเมทานอลมีพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไปข้างหน้าเท่ากับ 44.87 กิโลจูลต่อโมล และพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาย้อนกลับเท่ากับ 25.48 กิโลจูลต่อโมล

5.2 ข้อเสนอแนะของงานวิจัย

1. ในการทำการทดลองควรควบคุมปริมาณของสารตั้งต้นของทุกการทดลองให้เท่ากัน
2. ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ควรทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ทุกชนิด เพื่อผลการคำนวณมีความถูกต้องมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] Shintre, M.S., Ghadge, R.S., and Sawant, S.B. Kinetics of esterification of lauric acid with fatty alcohols by lipase: Effect of fatty alcohol. J Chem Technol Biotechnol 77 (2002) : 1114-1121.
- [2] Shibasaki-Kitakawa, N., et al. Biodiesel production using anionic ion-exchange resin as heterogeneous catalyst. Bioresource Technology 98 (2007) : 416-421.
- [3] Demirbas, A. Biodiesel from sunflower oil in supercritical methanol with calcium oxide. Energy Conversion and Management 48 (2007) : 937-941.
- [4] Gerpen, J.V. Biodiesel processing and production. Fuel Processing Technology 86 (2005) : 1097-1107.
- [5] Hanh, H.D., et al. Biodiesel production by esterification of oleic acid with short-chain alcohols under ultrasonic irradiation condition. Renewable Energy 34 (2009) : 780-783.
- [6] Fraga-Dubreuil, J., et al. Catalysed esterifications in room temperature ionic liquids with acidic counteranion as recyclable reaction media. Catalysis Communications 3 (2002) : 185-190.
- [7] Chongkhong, S., et al. Biodiesel production by esterification of palm fatty acid distillate. Biomass and Bioenergy 8 (2007) : 563-568.
- [8] Park, Y.M., et al. Tungsten oxide zirconia as solid superacid catalyst for esterification of waste acid oil (dark oil). Bioresource Technology 101 (2010) : 6589-6593.
- [9] Feng, Y., et al. Biodiesel production using cation-exchange resin as heterogeneous catalyst. Bioresource Technology 101 (2010) : 1518-1521.

- [10] Gan, S., et al. Ferric sulphate catalysed esterification of free fatty acids in waste cooking oil. Bioresource Technology 101 (2010) : 7338-7343.
- [11] Yujaroen, D., et al. Esterification of palm fatty acid distillate (PFAD) in supercritical methanol: Effect of hydrolysis on reaction reactivity. Fuel 88 (2009) : 2011-2016.
- [12] Ngamsa-ard, W. Production of methyl esters from palm oil with high content of free fatty acids. Master's thesis, Department of Chemical Engineering, Chulalongkorn University, 2008.
- [13] Somsai, S. Kinetics of non-catalytic esterification of fatty acids in palm oil. Master's thesis, Department of Chemical Engineering, Chulalongkorn University, 2008.
- [14] Alenezi, R., et al. Esterification kinetics of free fatty acids with supercritical methanol for biodiesel production. Energy Conversion and Management 51 (2010) : 1055-1059.
- [15] Kusdiana, D., and Saka, S. Two-step preparation for catalyst-free biodiesel fuel production: Hydrolysis and methyl esterification. Applied Biochemistry and Biotechnology 113-116 (2004) : 781-791.
- [16] Berrios, M., et al. A kinetic study of the esterification of free fatty acids (FFA) in sunflower oil. Fuel 86 (2007) : 2383-2388.
- [17] Song, C., et al. Kinetic model for the esterification of oleic acid catalyzed by zinc acetate in subcritical methanol. Renewable Energy 35 (2010) : 625-628.
- [18] Rattanaphra, D., et al. Kinetic of myristic acid esterification with methanol in the presence of triglycerides over sulfated zirconia. Renewable Energy 36 (2011) : 2679-2686.
- [19] Pinnarat, T., and Savage, P.E. Noncatalytic esterification of oleic acid in ethanol. J. of Supercritical Fluids 53 (2010) : 53-59.

- [20] Ozbay, N., Oktar, N., and Tapan, N.A. Esterification of free fatty acids in waste cooking oils (WCO): Role of ion-exchange resins. Fuel 87 (2008) : 1789-1798.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ค่าเฉลี่ยและร้อยละของความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองเมื่อใช้ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีในการทอสารละลาย
อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก 5:1 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดัน
1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

เวลา (นาที)	ค่าของกรด			ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
0	278.30	278.30	278.30	278.30
5	123.30	126.90	122.12	124.10
10	87.68	90.66	83.30	87.21
15	63.21	66.69	54.34	61.41
20	42.79	49.34	41.69	44.61
25	33.70	36.15	31.05	33.63
30	27.55	31.62	25.70	28.29
35	25.00	26.42	22.30	24.57
40	19.49	20.88	17.45	19.27
45	17.06	18.60	15.18	16.95
50	16.84	16.52	13.00	15.45
55	15.77	16.33	12.83	14.97
60	15.75	16.13	12.80	14.89
120	15.72	15.71	12.14	14.52
180	15.72	15.34	12.15	14.41
240	15.55	14.95	11.09	13.86

ตารางที่ ก-2 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยและร้อยละของความคลาดเคลื่อนของการทดลอง เมื่อใช้ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีในการกวาดสารละลาย อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก 5:1 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

เวลา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง				ความคลาดเคลื่อน	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Max	Min
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
5	55.70	54.40	56.12	55.41	1.29	1.81
10	68.50	67.43	70.07	68.66	2.05	1.80
15	77.29	76.04	80.48	77.93	3.26	2.43
20	84.62	82.27	85.02	83.97	1.25	2.02
25	87.89	87.01	88.84	87.91	1.05	1.03
30	90.10	88.64	90.76	89.83	1.04	1.33
35	91.02	90.51	91.99	91.17	0.89	0.73
40	93.00	92.50	93.73	93.07	0.70	0.62
45	93.87	93.32	94.55	93.91	0.68	0.63
50	93.95	94.06	95.33	94.45	0.93	0.53
55	94.33	94.13	95.39	94.62	0.82	0.51
60	94.34	94.20	95.40	94.65	0.79	0.47
120	94.35	94.36	95.64	94.78	0.90	0.45
180	94.35	94.49	95.63	94.82	0.85	0.50
240	94.41	94.63	96.02	95.02	1.05	0.64

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองของการศึกษาผลกระทบของความเร็วยรอบในการกวนสารละลาย

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองเมื่อใช้ความเร็วยรอบ 50 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย อัตราส่วน โดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก 5:1 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดัน 1000 ปอนด์ ต่อตารางนิ้ว

เวลา (นาที)	ค่าของกรด
0	287.30
5	139.64
10	101.05
15	73.37
20	55.26
25	42.37
30	34.47
35	31.43
40	29.25
45	23.79
50	22.07
55	18.27
60	16.84
120	15.41
180	14.00
240	13.07

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองเมื่อใช้ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาทีในการทวนสารละลาย
อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก 5:1 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดัน
1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

เวลา (นาที)	ค่าของกรด
0	287.30
5	125.84
10	90.48
15	65.90
20	51.15
25	37.27
30	30.41
35	26.76
40	23.18
45	18.62
50	17.24
55	14.27
60	14.16
120	13.76
180	13.74
240	13.33

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองเมื่อใช้ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย
อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลิก 5:1 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดัน
1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

เวลา (นาที)	ค่าของกรด			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	278.30	278.30	278.30	278.30
5	123.30	126.90	122.12	124.10
10	87.68	90.66	83.30	87.21
15	63.21	66.69	54.34	61.41
20	42.79	49.34	41.69	44.61
25	33.70	36.15	31.05	33.63
30	27.55	31.62	25.70	28.29
35	25.00	26.42	22.30	24.57
40	19.49	20.88	17.45	19.27
45	17.06	18.60	15.18	16.95
50	16.84	16.52	13.00	15.45
55	15.77	16.33	12.83	14.97
60	15.75	16.13	12.80	14.89
120	15.72	15.71	12.14	14.52
180	15.72	15.34	12.15	14.41
240	15.55	14.95	11.09	13.86

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองเมื่อใช้ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย
อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก 5:1 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดัน
1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

เวลา (นาที)	ค่าของกรด
0	287.30
5	129.10
10	93.17
15	65.23
20	49.39
25	37.61
30	30.13
35	25.62
40	21.74
45	19.01
50	16.54
55	16.02
60	15.04
120	14.80
180	13.87
240	13.84

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองของการศึกษาผลกระทบของความดันในการทำปฏิกิริยา

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองเมื่อใช้ความดัน 800 ปอนด์ต่อตารางนิ้วในการทำปฏิกิริยา ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก 5:1 และอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ค่าของกรด
0	287.30
5	123.41
10	90.05
15	63.48
20	48.85
25	37.05
30	31.58
35	23.71
40	21.35
45	20.41
50	17.71
55	17.02
60	15.85
120	13.31
180	12.82
240	12.76

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองเมื่อใช้ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วในการทำปฏิกิริยา ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอิริก 5:1 และอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที่)	ค่าของกรด			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	278.30	278.30	278.30	278.30
5	123.30	126.90	122.12	124.10
10	87.68	90.66	83.30	87.21
15	63.21	66.69	54.34	61.41
20	42.79	49.34	41.69	44.61
25	33.70	36.15	31.05	33.63
30	27.55	31.62	25.70	28.29
35	25.00	26.42	22.30	24.57
40	19.49	20.88	17.45	19.27
45	17.06	18.60	15.18	16.95
50	16.84	16.52	13.00	15.45
55	15.77	16.33	12.83	14.97
60	15.75	16.13	12.80	14.89
120	15.72	15.71	12.14	14.52
180	15.72	15.34	12.15	14.41
240	15.55	14.95	11.09	13.86

ตารางที่ ค-3 ผลการทดลองเมื่อใช้ความดัน 1200 ปอนด์ต่อตารางนิ้วในการทำปฏิกิริยา ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก 5:1 และอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ค่าของกรด
0	287.30
5	124.84
10	84.58
15	57.98
20	45.19
25	33.37
30	29.95
35	26.09
40	20.46
45	16.88
50	14.99
55	14.04
60	13.79
120	13.49
180	13.37
240	13.29

ตารางที่ ค-4 ผลการทดลองเมื่อใช้ความดัน 1400 ปอนด์ต่อตารางนิ้วในการทำปฏิกิริยา ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก 5:1 และอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ค่าของกรด
0	287.30
5	125.37
10	86.23
15	58.24
20	43.73
25	33.48
30	29.23
35	27.60
40	22.45
45	19.28
50	16.82
55	16.16
60	15.96
120	12.99
180	12.44
240	12.24

ภาคผนวก ง

ผลการทดลองของการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

ตารางที่ ง-1 ผลการทดลองเมื่อใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสในการทำปฏิกิริยา ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลวริก 1:1 และความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

เวลา (นาที)	ค่าของกรด
0	278.30
5	273.55
10	272.33
15	269.11
20	267.67
25	264.64
30	262.06
35	261.21
40	258.92
45	256.81
50	254.46
55	252.87
60	251.27
120	239.79
180	228.89
240	220.23

ตารางที่ ง-2 ผลการทดลองเมื่อใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสในการทำปฏิกิริยา ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลิก 1:1 และ ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

เวลา (นาที)	ค่าของกรด
0	278.30
5	260.88
10	248.89
15	231.49
20	223.16
25	211.74
30	200.83
35	194.78
40	186.29
45	180.43
50	174.47
55	169.71
60	166.59
120	137.32
180	121.68
240	115.23

ตารางที่ ง-3 ผลการทดลองเมื่อใช้อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสในการทำปฏิกิริยา ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลิก 1:1 และ ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

เวลา (นาที)	ค่าของกรด
0	278.30
5	236.56
10	198.49
15	167.37
20	146.64
25	127.71
30	117.29
35	111.89
40	104.24
45	100.15
50	96.43
55	92.88
60	89.40
120	82.66
180	79.49
240	78.84

ตารางที่ ง-4 ผลการทดลองเมื่อใช้อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสในการทำปฏิกิริยา ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลิก 1:1 และความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

เวลา (นาที)	ค่าของกรด
0	278.30
5	183.03
10	142.92
15	111.72
20	94.36
25	86.38
30	79.34
35	77.98
40	74.50
45	72.63
50	71.63
55	71.08
60	70.29
120	70.05
180	69.01
240	69.00

ภาคผนวก จ

ผลการทดลองของการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริก

ตารางที่ จ-1 ผลการทดลองเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลอริกที่ 1:1 ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

เวลา (นาที)	ค่าของกรด
0	278.30
5	183.03
10	142.92
15	111.72
20	94.36
25	86.38
30	79.34
35	77.98
40	74.50
45	72.63
50	71.63
55	71.08
60	70.29
120	70.05
180	69.01
240	69.00

ตารางที่ ๑-2 ผลการทดลองเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลิกที่ 2.5:1 ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

เวลา (นาที)	ค่าของกรด
0	278.30
5	165.77
10	109.78
15	87.37
20	70.05
25	58.30
30	49.59
35	44.47
40	40.36
45	37.90
50	36.04
55	35.56
60	34.88
120	33.15
180	32.86
240	32.85

ตารางที่ ๑-3 ผลการทดลองเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลิกที่ 5:1 ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

เวลา (นาที)	ค่าของกรด
0	278.30
5	123.30
10	87.68
15	63.21
20	42.79
25	33.70
30	25.04
35	22.22
40	18.52
45	17.06
50	16.55
55	16.22
60	16.01
120	15.96
180	15.95
240	15.86

ตารางที่ ๑-4 ผลการทดลองเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดลิกที่ 10:1 ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาทีในการกวนสารละลาย ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

เวลา (นาที)	ค่าของกรด
0	278.30
5	129.55
10	88.06
15	63.04
20	42.56
25	32.74
30	25.85
35	20.07
40	17.66
45	16.78
50	16.34
55	16.01
60	15.97
120	15.96
180	15.76
240	15.69

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพรศิริ เพิ่มทรัพย์ เกิดเมื่อวันที่ 14 สิงหาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดชลบุรี จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่โรงเรียนพนัสพิทยาคาร จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิตในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ในปีการศึกษา 2550 และได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโทในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2551